



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior Tecnológica de Tomar

Pedro Miguel Lopes Freitas

Protótipo de Veículo Elétrico

Projeto

Orientado por:

Doutor Manuel Barros , Instituto Politécnico de Tomar

Mestre Pedro Granchinho, Instituto Politécnico de Tomar

Mestre Carlos Ferreira, Instituto Politécnico de Tomar

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Mestre
em Controlo e Eletrónica Industrial

Desenvolvimento de Protótipo de Veículo Elétrico

Dissertação Submetida ao Departamento de Engenharia da
Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Submetida por
Pedro Miguel Lopes Freitas

Aceite sob recomendação dos orientadores
Doutor Manuel Fernando Martins de Barros
Mestre Pedro Manuel Granchinho de Matos
Mestre Carlos Alberto Farinha Ferreira

Novembro de 2012

Resumo

A colocação da tecnologia ao serviço do homem é uma das principais causas da evolução da nossa civilização. A revolução industrial foi despoletada pela invenção da máquina a vapor que gradualmente substituiu a força animal (século XVII). Desde o aparecimento desta maquinaria a sua utilização no quotidiano tem assumido uma maior necessidade e dependência, criando assim a oportunidade de inovação e evolução. A evolução atual é vertiginosa.

Devido à elevada densidade de energia dos combustíveis fósseis esta tem sido a opção utilizada em sistemas móveis autónomos. Esta última é convertida em energia mecânica através da utilização dos motores de combustão interna que entretanto substituíram as velhas máquinas a vapor. Garante-se assim uma elevada autonomia.

O domínio da utilização da energia elétrica permitiu ao homem acelerar ainda mais essa evolução. O aparecimento dos motores elétricos foi um passo importante neste processo. No entanto, as dificuldades no armazenamento da energia elétrica têm limitado a utilização destas máquinas a instalações e equipamentos em que a energia era gerada no próprio local ou distribuída com recurso a suportes físicos.

Em termos da utilização em veículos o armazenamento de energia em baterias sempre impôs limitações na autonomia do veículo. As baterias evoluíram atualmente de forma a se poder, com vantagens, recorrer à sua utilização como fonte energia para a motorização elétrica de veículos.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um veículo elétrico.

Pretende-se que este seja adequado para qualquer utilizador. No seu desenvolvimento uma preocupação primária foi que este possa adaptar-se a pessoas com mobilidade reduzida.

Pretende-se que o veículo se possa movimentar em ambiente adversos. Entende-se por adversos, a existência de pisos heterogêneos ou a existência de obstáculos.

O veículo conceitualmente mais simples é do tipo “*ONE WHEEL*” mas este apresenta algumas limitações como por exemplo de instabilidade quando em repouso. Por este mesmo motivo optou-se por uma concepção em *DUO WHEEL*. Este apresenta a vantagem de ser estável no repouso e ser holonómico.

Outros autores têm feito várias tentativas para conceber este tipo de veículo, como Ben S. Cazzolato, Chris Dyer, Kane Fulton, Jonathon Harvey, Evan Schumann, Charles Zhu, Luke Charles Francou, Jack Scott Parsons, Benjamin John Wright, Bo Zhu, Jonathon R. Atterton, Ben L. Davis, Samuel C. Hart and Erin E. Pearce do projeto EDWARD [1] e Kerry Mclean com seus *monowheel* [2].

Este trabalho consistiu na concepção da parte mecânica, elétrica e eletrónica do veículo.

Relativamente à parte mecânica foi desenvolvido um protótipo em que a sua geometria tomou em conta vários fatores: o “ângulo de camber”; a estabilidade do veículo (relacionado com o seu centro de massa); o posicionamento dos motores; a atratividade no ponto de vista estético e a interação com o utilizador.

No aspeto elétrico procedeu-se à escolha dos motores e baterias adequados à dimensão do veículo. No ponto de vista eletrónico foram desenvolvidos dois conversores eletrónico de potência a operar com modulação de PWM a três níveis com capacidade de operar nos quatro quadrantes (corrente / tensão).

No projeto em todo o sistema, tal como foi já mencionado anteriormente, houve a preocupação de desenvolver um sistema de comando ergonómico e intuitivo por utilização de um *joystick* o que levou ao desenvolvimento de soluções originais que serão apresentadas e desenvolvidas ao longo da dissertação.

Palavras-Chave: Mobilidade, conversor eletrónico de potência, PWM de três níveis, ergonomia.

Abstract

Putting technology at the service of man is one of the main causes of the evolution of our civilization. The Industrial Revolution was triggered by the invention of the steam engine which gradually replaced animal power (XVII century). From the appearance of this machinery, its use in everyday life has assumed a greater need and dependence, thereby creating an opportunity for innovation and developments. The current evolution is vertiginous.

Due to the high energy density of fossil fuels, this option has been used in autonomous mobile systems. The latter is converted into mechanical energy through the use of internal combustion engines which have replaced the old steam engines. This ensures a high autonomy.

The field of use of electricity allowed man to further accelerate this trend. The emergence of electric motors was an important step in this process. However, the difficulties in storing electricity have limited the use of these machines to plant and equipment in which the energy was generated on-site or distributed using physical media.

In terms of vehicle use, energy storage in batteries always imposed limitations on the autonomy of the vehicle. The batteries currently developed so as to be able, with many advantages, resorting to their use as energy source for the electric vehicle powertrain.

This work corresponds to the development of an electric vehicle.

It is intended that this is adequate to any user. In its development a primary concern was that it can adapt to people with reduced mobility.

It is intended that the vehicle can move in adverse environment. It is understood by adverse, the existence of heterogeneous floors or the existence of obstacles.

The simpler vehicle type is the "ONE WHEEL" but this has some limitations such as instability when at rest. For the same reason we opted for a conception in DUO WHEEL. This has the advantage of being stable in rest and be holonomic.

Others authors have made several attempts to conceive this type of vehicle such as Ben S. Cazzolato, Chris Dyer, Kane Fulton, Jonathon Harvey, Evan Schumann, Charles Zhu, Luke Charles Francou, Jack Scott Parsons, Benjamin John Wright, Bo Zhu, Jonathon R. Atterton, Ben L. Davis, Samuel C. Hart and Erin E. Pearce EDWARD project [1] and Kerry Mclean with his monowheel [2].

This work consisted in the design of the mechanical, electrical and electronics of the vehicle.

For the mechanical part was developed a prototype where its geometry took into account several factors: the "camber angle", the vehicle stability (related to its center of mass), the positioning of the engines, the attractiveness at the point of aesthetically and interaction with the user.

Regarding the electric part of the vehicle proceeded to the choice of engines and batteries appropriate to the size of the vehicle. In electronic terms, there were developed two electronic power converters to operate with PWM modulation at three levels with the ability to operate in all four quadrants (current / voltage).

Throughout the system design, as was previously mentioned, there was the concern to develop a control system that is ergonomic and intuitive by using a joystick.

Keywords: Mobility, power electronic converter, PWM three-level ergonomics.

Agradecimentos

Agradeço aos orientadores, Dutor Manuel Barros, Mestre Carlos Ferreira e Mestre Pedro Granchinho pelo acompanhamento constante durante o desenvolvimento do projeto, mesmo a horas impróprias, e pela disponibilidade incondicional no esclarecimento de dúvidas e aconselhamento teórico-prático.

Agradeço também:

Ao Encarregado de Trabalhos, Eng. Pedro Neves, sempre disponível para as várias solicitações e pelo constante acompanhamento.

Ao Doutor Hugo Ribeiro, pelas ideias e colaboração prestada em diversas ocasiões.

Agradeço aos familiares e amigos pela compreensão da minha ausência nas vossas vidas.

Não poderia faltar em dedicar ao meu Avô (que Deus esteja contigo), que foi como um Pai, com a sua própria vontade de acreditar que estudando, poderemos abrir novos horizontes.

Quero ainda agradecer a todos os que de certo modo contribuíram, direta ou indiretamente, para esta dissertação.

Obrigado a todos.

Índice

Resumo	V
Abstract	VII
Agradecimentos	IX
Índice	XI
Lista de Figuras	XV
Lista de Tabelas	XXI
Lista de Abreviaturas	XXIII
Glossário	XXV
Lista de Símbolos	XXVII
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Descrição Geral	1
1.2 Objetivos do Projeto	1
1.2.1 Limitações da Configuração <i>One Wheel</i>	1
1.2.2 Princípio de Deslocamento do Veículo “ <i>Duo wheel</i> ”	3
1.3 Estrutura do Relatório	3
Capítulo 2 Estado da Arte	5
Capítulo 3 Conceitos Físicos	13
3.1 Introdução à Cinemática do Veículo	13
3.1.1 Espaço Vetorial	13
3.1.2 Espaço Escalar	15
3.2 Movimento Circular	18
3.2.1 Grandezas Angulares	18
3.2.2 Deslocamento Angular ($\Delta\phi$)	19

3.2.3	Velocidade Angular (ω)	19
3.2.4	Aceleração Angular (α)	20
3.2.5	Período e Frequência	21
3.2.6	Movimento Circular Uniforme	21
3.2.7	Movimento Circular Uniformemente Variado	22
3.3	Conceito de Força	23
3.3.1	Força (F)	23
3.3.2	Força da Gravidade (F_g)	24
3.3.3	Força de Atrito (F_a)	25
3.3.4	Força de Resistência ao Rolamento (F_{rr})	27
3.3.5	Força de Resistência Aerodinâmica (F_{da})	28
3.3.6	Força Resultante (F_r)	28
Capítulo 4	Estrutura Mecânica	29
4.1	Conceito de deslocamento Motor/Roda.	30
4.2	Equipamentos Adaptados	31
4.2.1	Baterias	31
4.2.2	Motores	32
4.3	Construção por partes	33
4.3.1	Roda Dentro da Própria Roda	34
4.3.2	Preparação dos Motores	35
4.3.3	Alinhamento do Ângulo “Sopé” e Direção	35
4.3.4	Alinhamento e Solidificação de Toda a Estrutura	37
4.3.5	Base Suporte Baterias	38
4.3.6	Tratamento Antiferrugem	39
4.4	Fibragem e Pintura	42
4.4.1	Preparação da Fibra em Placa	43
4.4.2	Moldagem e Fixação	44
4.4.3	Corte e Moldagem de Vidro Acrílico	45

4.4.4	Apoio de Dobradiças Transparentes	45
4.4.5	Recorte para Janela	46
4.4.6	Pintura	47
4.4.7	Estudo da Cor	47
4.5	Montagem	49
Capítulo 5	Comando	51
5.1	Introdução	51
5.2	Modulador	52
5.2.1	PWM a Dois Níveis	52
5.2.2	PWM a Três Níveis	54
5.3	Conversor cc/cc	55
5.3.1	Seleção dos Semicondutores de Potência	56
5.3.2	Dimensionamento do Dissipador de Calor	57
5.4	Placa de Interface	61
5.4.1	Objetivos do Comando	61
5.4.2	Sistemas Desenvolvidos	62
5.4.3	Desenvolvimento do Interface Homem/Máquina	63
5.5	Circuitos auxiliares	71
5.5.1	Geração do Valor Simétrico da Referência	71
5.5.2	Proteção de Subtensão	72
5.5.3	Proteção de Sobretensão	75
5.5.4	Inibição por Excesso de Corrente	76
5.6	Placas Implementadas	76
5.6.1	Modulador PWM	77
5.6.2	Circuito do Conversor	78
5.6.3	Placa de Interface Comando/Referência para PWM	82
5.6.4	Criação de Tensões Negativas	87
5.6.5	Placa de Ajuste dos Valores de Referência	88

Capítulo 6	Controlo	91
6.1	Controlo PID	91
6.1.1	Tipos de Controlo	92
6.1.2	Controlo PID	92
6.1.3	Controlo PI	94
6.2	Controlo do Motor	94
6.2.1	Modelo Genérico do Motor	95
6.2.2	Desenvolvimento de um Estimador da Velocidade do Motor	97
6.2.3	Cálculo da U_a	98
6.2.4	Valor da Resistência R_a	102
6.2.5	Corrente do Motor (i_a)	103
6.2.6	Testes ao Sistema	108
Capítulo 7	Conclusões	111
7.1	Conclusão	111
7.2	Perspetivas de Desenvolvimento Futuro	112
7.2.1	Controlo	112
7.2.2	Comando	113
7.2.3	Estrutura Física	113
Capítulo 8	Bibliografia	115

Lista de Figuras

<i>Figura 1-1: Princípio do one wheel [3] [4] [5].....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2-1: Primeiro “One Wheel” de Marselha Rousseau em 1869 [6].....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2-2: O modelo de Greene & Dyer patenteado em 1869 [6]</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2-3: O modelo do Italiano M. Goventosa na cidade de Udine [7].</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2-4: Modelo de tanque de combate para segunda Guerra Mundial (1933) [8].</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2-5: Tanque de reconhecimento de zona na Segunda Guerra Mundial (1945) [8]. ..</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2-6: Trator dentro da roda (1933) [9].....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2-7: Protótipo de trator, patenteado por Charles Tayler [10].</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2-8: Projeto patenteado por Charles Tayler em 1960 [10].....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-9: Modelo gráfico da patente [10]</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-10: Modelo carro não patenteado pelo Charles Tayler em 1964 [10].</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2-11: Um dos primeiros modelos construídos por McLean em 1971 [2].</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-12: Os modelos atuais de Monowheel que circulam em estrada [2] [11].....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2-13: Projeto acadêmico, EDWARD, de Duo Wheel [1].</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3-1: Representação da trajetória como sendo a variação do vetor posição.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3-2: Representação da definição de radiano com base no círculo trigonométrico [13].....</i>	<i>18</i>

<i>Figura 3-3: Representação da aceleração resultante (a_y) [13].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3-4: Representação da força Peso (P).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3-5: Representação da força de resistência ao rolamento.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4-1: Primeira aproximação do sistema de centralização e deslocamento interno da roda</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4-2: Bateria Yuasa NPC24-12I [21] [22].....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4-3: Característica da capacidade versus número de ciclos [22].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4-4: Motor MY1018E-300-400W [23].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4-5: Gráfico das características do motor [23].....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4-6: Abordagem de acoplamento Veículo/Roda, sem tração.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4-7: Remoção a roda dentada do eixo do motor.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4-8: Ângulo de Sopé [24].....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4-9: Veículo com ângulo sopé desportivo, em fase de testes.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4-10: Acerto do ângulo sopé no veículo.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-11: Montagem das rodas.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-12: Construção do suporte de baterias.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-13: Construção dos parafusos para suporte de baterias.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-14: Alinhamento dos futuros visores do veículo.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-15: Alinhamento dos futuros visores do veículo.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4-16: Processo de remoção de ferrugem.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4-17: Isolamento das peças a não pintar.</i>	<i>41</i>

<i>Figura 4-18: Material já com tratamento de Zinco.</i>	41
<i>Figura 4-19: Montagem das Rodas.</i>	41
<i>Figura 4-20: Montagem de Tabuleiro das baterias e Motor de tração.</i>	42
<i>Figura 4-21: Veículo em estrutura sólida.</i>	42
<i>Figura 4-22: Placa fibra ainda em tratamento.</i>	43
<i>Figura 4-23: Etapas de Moldagem da fibra e fixação.</i>	44
<i>Figura 4-24: Vários moldes em papel / cartão.</i>	46
<i>Figura 4-25: Moldes dos prolongadores em Aço e em Vidro Acrílico.</i>	46
<i>Figura 4-26: Aplicação da dobradiça com prolongadores.</i>	46
<i>Figura 4-27: Protótipo para estudo de cor.</i>	47
<i>Figura 4-28: Protótipo com várias tonalidades para estudo da cor.</i>	48
<i>Figura 4-29: Protótipo com pintura final.</i>	49
<i>Figura 5-1: Esquema do acionamento elétrico de potência do veículo de teste [25].</i>	51
<i>Figura 5-2: Gráfico estado do PWM 2 níveis sobre o sentido rotação.</i>	53
<i>Figura 5-3: Criação de PWM a dois níveis.</i>	53
<i>Figura 5-4: Gráfico estado do PWM dois níveis sobre o sentido rotação.</i>	54
<i>Figura 5-5: Figura do comportamento de referência para PWM a 3 níveis.</i>	55
<i>Figura 5-6: Esquema de ponte completa (Full-Bridge).</i>	56
<i>Figura 5-7: Variação do R_{DSon} em função da temperatura do semiconductor [27]</i>	59
<i>Figura 5-8: Tensão e corrente num MOSFET durante as comutações [28].</i>	60

<i>Figura 5-9: Imagem de comando plano.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5-10: Imagem de comando usual, efeito combinado nos eixos XY.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5-11: Sentidos do comando para forças percentuais nas rodas.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5-12: Pontos de referência do comando / sentido dos motores.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5-13: Esquema de ligação de resistência variável de 0 a 5 Vdc.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5-14: Esquema de ligação de resistência variável de -5 a 5 Vdc.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5-15: Correlação entre tensão para PWM (Vref) e tensão para cada regulador....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5-16: Utilização de montagem diferença com AmpOp</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5-17: Divisor de tensão para proteção de subtensão.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5-18: Divisor tensão para proteção sobretensão.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5-19: Inibição por excesso de corrente.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5-20: Esquemático de conversão de valor analógico para PWM</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5-21: Curvas características de dimensionamento da frequência de oscilação.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5-22: Esquema de 4 meias pontes (2 pontes completas).....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5-23: Saída diferencial para tensão de saída perto de zero.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5-24: Saída diferencial para tensão de saída inferior a zero: a) tensão de saída perto do limite máximo negativo; b) tensão de saída intermédia.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5-25: Saída diferencial para tensão de saída superior a zero: a) tensão de saída perto do limite máximo positivo; b) tensão de saída intermédia.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5-26: Diagrama de blocos do sistema de interface entre joystick e modulador.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5-27: Esquema parcial de tratamento sinal do comando para placa PWM.....</i>	<i>84</i>

<i>Figura 5-28: Placa do circuito de conversão do comando para placa PWM.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5-29: Esquema de implementação do modelo matemático do interface.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5-30: Esquema de implementação da banda morta.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5-31: Esquema do seletor de velocidade.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5-32: Esquema de placa para tensões simétricas.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5-33: Imagem da placa tensões inversas.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5-34: Tensões de saída +8 Vdc (canal 1), -8 Vdc (canal 2).</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5-35: Esquema para ajuste set-point dos valores do comando.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 6-1: Representação do sistema de controlo de um motor DC [31].</i>	<i>91</i>
<i>Figura 6-2: Exemplo de saída de um sistema com controlo PID [32].</i>	<i>93</i>
<i>Figura 6-3: Diagrama de blocos de PI genérico.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 6-4: Circuito equivalente de motor DC.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 6-5: Diagrama de blocos da equação geral de estimativa da velocidade.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 6-6: Montagem de redução de tensão e filtragem de U_a.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6-7: Tensão de saída da meia ponte (canal 1) e da saída filtrada (canal 2, em velocidade lenta.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6-8: Tensão de saída da meia ponte (canal 1) e da saída filtrada (canal 2, em velocidade turbo.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6-9: Montagem para determinar o diferencial da tensão do motor.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 6-10: Tipologia de filtro Butterworth de 2º Ordem.</i>	<i>100</i>

<i>Figura 6-11: Respostas do filtro calculado (canal 2) com a referência (canal 1) com a máxima tensão positiva.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 6-12: Dispersão de valores em relação à média de R_a.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 6-13: Excerto do Datasheet de sonda de corrente HXS 50-NP: esquema de ligação de sonda para 25A.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 6-14: Esquema de ligação e calibração da sonda de corrente.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 6-15: Imagem da aplicação da sonda de corrente com fios de potências separados.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 6-16: Montagem do andar de diferença entre a referência e a tensão referencial da sonda.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 6-17: Montagem do andar estimador da velocidade de rotação do motor.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 6-18: Sinal da rotação estimada com o rotor trancado mecanicamente.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6-19: Sinal da rotação estimada com o rotor em movimento máximo positivo (figura da esquerda) e negativo (figura da direita).</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6-20: Sinal da velocidade estimada (canal 1) com a referência do comando (canal 2) para o mesmo motor; motor em movimento máximo negativo.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6-21: Sinal da velocidade estimada (canal 1) com a referência do comando (canal 2) para o mesmo motor; motor em movimento máximo positivo.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6-22: Sinal da velocidade estimada (canal 1) com a referência do comando (canal 2) para o mesmo motor; motor em estado imóvel.</i>	<i>109</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 3-1 – Tabela de conversão das grandezas do movimento angular em movimento linear [13].</i>	20
<i>Tabela 3-2 – Tabela de conversão das equações entre MCU e MCUV [13].</i>	22
<i>Tabela 3-3 – Valores da aceleração gravitacional [15].</i>	24
<i>Tabela 4-1 – Tabela de características da bateria [22].</i>	32
<i>Tabela 4-2 – Tabela de características do motor [23].</i>	33
<i>Tabela 5-1 – Tensão de saída dos potenciômetros em função da posição no eixo.</i>	65
<i>Tabela 5-2 – Tabela de conversão entre a posição do joystick sobre os eixos e a tensão de saída.</i>	66
<i>Tabela 5-3 – Tabela estados do motor lado “esquerdo”.</i>	67
<i>Tabela 5-4 – Tabela de estados do motor lado “direito”.</i>	68
<i>Tabela 5-5 – Tabela de relação entrada-saída com alimentação de 0 e 5Vdc.</i>	69
<i>Tabela 5-6 – Tabela de relação entrada-saída com alimentação de -5 e 5Vdc.</i>	70
<i>Tabela 5-7 – Tabela de relação da carga da bateria com a tensão.</i>	73
<i>Tabela 6-1 – Tabela de registo dos valores de R_a.</i>	103

Lista de Abreviaturas

DC - Directional Current (Corrente Contínua).

CC - Corrente Contínua.

CC/CC - Corrente Contínua para Corrente Contínua.

ESTT - Escola Superior de Tecnologia de Tomar.

IPT - Instituto Politécnico de Tomar.

MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (transístor de efeito de campo de porta isolada).

PCB - *Printed Circuit Board* (placa de circuito impresso).

PWM - *Pulse Width Modulation* (modulação de largura de impulso).

MLI - Modulação de largura de impulso.

VE - Veículo Elétrico.

IC - *Integrated Circuit* (circuito integrado).

Glossário

Datasheet	- Documento no qual o fabricante resume as características e especificações de um componente.
Delay	- Atraso temporal de um sinal.
Duty Cycle (Factor de Ciclo)	- O factor de ciclo, D, de um sinal PWM consiste na relação entre o seu tempo de condução e o seu período.
AmpOp	- Abreviatura da designação de amplificador operacional.

Lista de Símbolos

a	Aceleração linear
A	Área
C	Condensador
D	<i>Duty cycle</i>
d	Distância
e_p	Espaço percorrido
$e(t)$	Sinal de erro
E	Força eletromotriz
f	Frequência
F	Força
F_a	Força de atrito
f_c	Frequência de corte
F_{da}	Força de resistência aerodinâmica
F_g	Força gravítica
F_r	Força resultante
f_r	Coefficiente de resistência ao rolamento

F_{rr}	Força resistente ao rolamento
g	Aceleração gravítica
I	Corrente
$I_{D_{RMS}}$	Corrente do dreno (valor eficaz)
K_d	Constante derivativa
K_i	Constante integral
K_p	Constante proporcional
k_v	Constante de velocidade
L	Bobina
m	Massa
n	Rotação
N	Força normal
p	Pressão
P	Peso
P_{motor}	Potência do motor
P_c	Perdas de condução
P_d	Potencia dissipada
P_s	Perdas de comutação
$r(t)$	Sinal de referência

R	Resistência
$R_{DS_{on}}$	Resistência aos terminais dreno-source
$R_{th_{c-s}}$	Resistência térmica entre a cápsula e o dissipador
$R_{th_{j-c}}$	Resistência térmica entre semicondutor e cápsula
$R_{th_{s-a}}$	Resistência térmica entre dissipador e o ambiente
s	Deslocamento
t	Tempo
T_a	Temperatura ambiente
T_j	Temperatura da junção
$t_{(on-off)}$	Tempo de transição entre condução e corte
$t_{(off-on)}$	Tempo de transição de corte à condução
t_r	Tempo de subida da corrente
t_f	Tempo de descida da corrente
T	Período
$u(t)$	Nível de atuação
v	Velocidade linear
ΔV	Variação da velocidade
V	Tensão
$V_{M_{dir}}$	Tensão para motor direito
$V_{M_{esq}}$	Tensão para motor esquerdo

V_{ref}	Tensão de referência
V_{sobret}	Tensão de sobretensão
V_{sub}	Tensão de subtensão
$y(t)$	Sensor de saída
ρ	Densidade de massa
φ	Deslocamento angular
ω	Velocidade angular
α	Aceleração angular
θ	Angulo angular
μ_c	Coeficiente de atrito estático
μ_e	Coeficiente de atrito dinâmico
ς	Coeficiente de temperatura

Capítulo 1 Introdução

Com este projeto pretende-se conceber um veículo elétrico com uma geometria tipo “veículo dentro da roda”. O sistema mais simples deste tipo de veículo possui apenas uma única roda, no entanto apresenta várias limitações de estabilidade (perda de equilíbrio), os quais serão abordados neste capítulo.

Para obviar as limitações anteriormente apontadas, opta-se por um veículo com duas rodas, alinhadas lateralmente (sistema diferencial).

1.1 Descrição Geral

Este projeto pretende construir e desenvolver um veículo, que tenha capacidade de movimentação em diversos tipos de pisos, que seja um veículo não poluente (elétrico), de fácil interação e intuitivo para o utilizador.

1.2 Objetivos do Projeto

Pretende-se que o veículo elétrico possua uma série de características:

- Capacidade de locomoção em vários tipos de terreno.
- Capacidade de ultrapassar desníveis e obstáculos.
- Raio de viragem reduzido (para permitir a sua utilização em espaços com obstáculos).
- Adaptabilidade a pessoas com redução motora.
- Apresente um elevado nível de segurança para o utilizador.

1.2.1 Limitações da Configuração *One Wheel*

Tal como foi referido anteriormente, pretende-se que o veículo se possa deslocar em ambientes com relevos acidentados.

Em termos de configuração, o sistema mais simples é o *One Wheel*, mas este apresenta uma instabilidade inerente devido à sua configuração de pêndulo invertido.

A *Figura 1-1* apresenta alguns exemplos do sistema *One Wheel*. O deslocamento numa única roda pode ser usado por mero divertimento por pessoas com maior habilidade, ou por qualquer utilizador recorrendo a sistemas de controlo. O controlo do veículo é uma ajuda importante na estabilidade de todo o sistema, reforçando a segurança.

One wheel, conforme o próprio nome assim indica, representa deslocamento com uma única roda. Este tipo de sistema apresenta vários problemas relacionados com a estabilidade. Estes são especialmente relevantes ao executar determinadas ações na condução, nomeadamente em repouso, na viragem, em aceleração e na travagem.

Em repouso, como já referido, o sistema tem a topologia de um pendulo invertido, sendo naturalmente instável.

Na viragem, o somatório das forças perpendiculares ao deslocamento terá que ser nulo. Só assim se mantém a estabilidade do sistema.

No caso da aceleração ou travagem, poderá haver uma rotação da estrutura sobre si mesma, ou seja um fenómeno definido por “*loop*”.



Figura 1-1: Princípio do one wheel [3] [4] [5].

Como solução optou-se por uma configuração diferencial que utiliza duas rodas paralelas uma à outra “*Duo Wheel*”.

Existem várias diferenças em termos de estabilidade entre veículo em “*Duo Wheel*” e o veículo em “*One Wheel*”. Estas são:

- ✓ Estabilidade a forças laterais.
- ✓ Estabilidade na viragem.
- ✓ Maior segurança na travagem e na aceleração.

A estabilidade dos movimentos laterais e na viragem ao facto do centro de massa de todo o sistema ficar entre os apoios de roda (pontos de apoio).

Em relação à segurança, tanto na travagem como na aceleração, continua a existir a possibilidade de este fazer “*loop*”, no entanto a recuperação dessa situação faz-se de modo muito mais seguro, devido a estabilidade lateral inerente.

1.2.2 Princípio de Deslocamento do Veículo “*Duo wheel*”

O deslocamento do veículo é uma consequência indireta do movimento do motor. O motor provoca o deslocamento do centro de massa do veículo. Com resposta à ação de deslocamento do centro de massa, existe uma reação que força o deslocamento do veículo.

As forças do par ação/reação tomam assim um papel preponderante na geometria do “*Duo Wheel*”, tal como será explicado posteriormente.

1.3 Estrutura do Relatório

O capítulo 1 efetua uma introdução ao tema e esquematiza a estrutura do relatório.

O capítulo 2 é dedicado ao estado de arte. Efetua-se um levantamento das soluções desenvolvidas ao longo da história e das suas limitações.

O capítulo 3 identifica as forças a que o veículo está sujeito. São focados os aspetos relativos ao equilíbrio ou à movimentação.

No capítulo 4 é desenvolvida toda a estrutura mecânica do protótipo. Esta estrutura é essencial para o estudo real das forças aplicadas e para realização de testes da componente eletrónica.

No capítulo 5 realiza-se todo o comando do veículo em malha aberta. São desenvolvidos os circuitos elétricos e eletrônicos necessários ao funcionamento do veículo, nomeadamente o sistema de interface Homem/Máquina, o conversor e os drivers para o mesmo.

No capítulo 6 foca-se o controlo (malha fechada). Efetua-se uma abordagem as componentes de dimensionamento do controlador e desenvolve-se um estimador da velocidade.

O capítulo 7 apresenta as conclusões sobre todo o projeto desenvolvido, focando ainda aspetos a desenvolver futuramente e possíveis inovações a efetuar.

Capítulo 2 Estado da Arte

O desenvolvimento do conceito de veículo dentro da roda, tanto quanto se conhece, iniciou-se no ano 1869. Inicialmente o veículo desenvolvido não era motorizado. Este era constituído por uma roda exterior, no interior da mesma estava reservado o espaço para o utilizador.

Na Figura 2-1: encontra-se representado o primeiro “*One Wheel*”, de Marselha Rousseau [6].

O problema deste tipo de veículo está relacionado com o manter da estabilidade do sistema, tanto em termos de equilíbrio lateral como de aceleração e travagem.

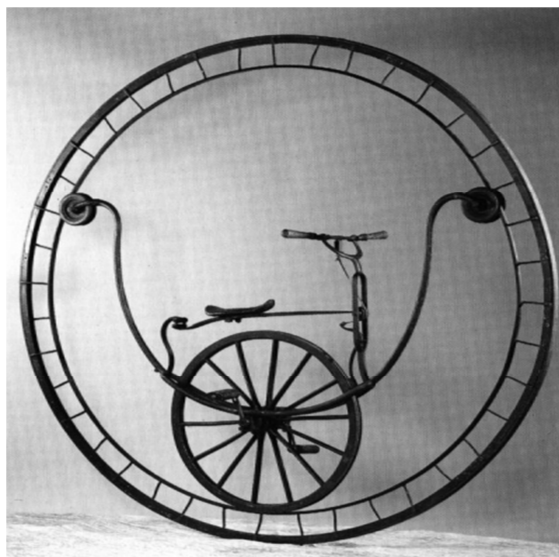


Figura 2-1: Primeiro “One Wheel” de Marselha Rousseau em 1869 [6].

Um outro veículo (Figura 2-1) patenteado nesse mesmo ano reflete algumas mudanças estruturais. Este foi desenvolvido por Greene & Dyer [6] .

Apesar da solução ser diferente, os problemas de base mantêm-se.

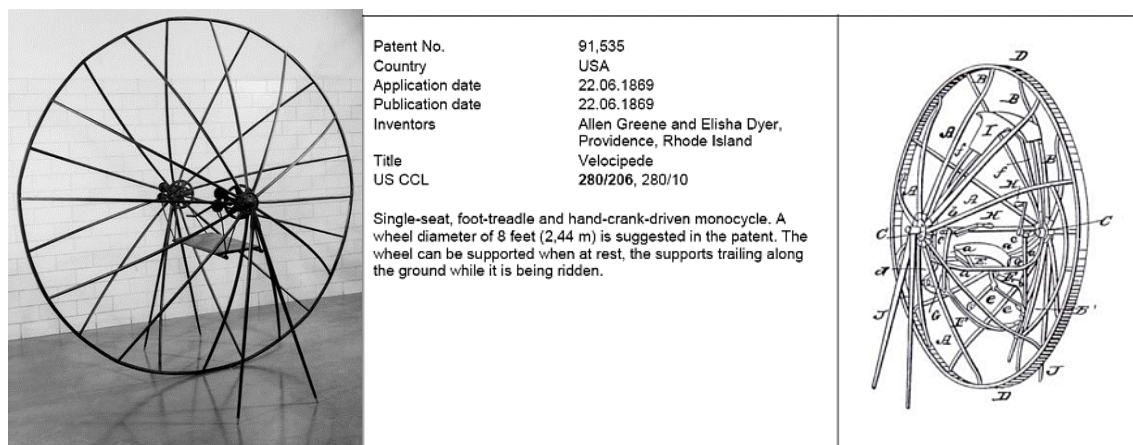


Figura 2-2: O modelo de Greene & Dyer patenteado em 1869 [6].

Na Itália, em 1931, dá-se um passo importante nesta tipologia de veículo (Figura 2-3), com a adaptação de um motor de combustão [7].



Figura 2-3: O modelo do Italiano M. Goventosa na cidade de Udine [7].

O conceito de Monocicleta (*One Wheel*) foi criado por desenhadores e idealistas. Várias das ideias desenhadas, desde século XVII, foram projetadas mas sempre com problemas semelhantes de estabilidade. Este problema é o verdadeiro obstáculo para que as ideias não passassem para um veículo comercialmente disponível.

As ideias e os conceitos foram aproveitados também para aplicações militares, nomeadamente com a construção de tanques de guerra em Novembro de 1933 e em 1945. O veículo de combate identificado na Figura 2-4 é composto por um corpo blindado, este é constituído por uma roda principal, complementada pela utilização de duas rodas mais

pequenas auxiliares, montadas na traseira. No sentido de tornar este veículo anfíbio, foram adicionadas barbatanas na roda principal. Para auxiliar na estabilidade utiliza-se um braço mecânico que permite deslocar o centro de massa no sentido longitudinal do veículo. Esta movimentação do centro de massa ao ajudar na estabilização do veículo permite aumentar a velocidade, a capacidade de travagem e de superar objetos ou obstáculos.

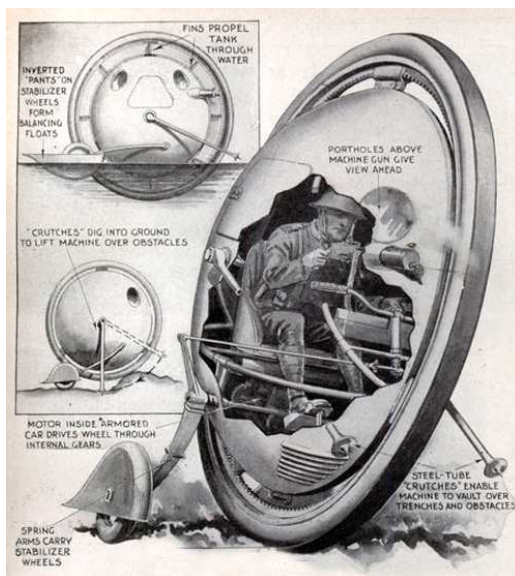


Figura 2-4: Modelo de tanque de combate para segunda Guerra Mundial (1933) [8].

Nas soluções anteriores os problemas de estabilidade estão sempre presentes. Estes colocam-se em dois eixos possíveis: longitudinal e transversal. Uma solução possível para a estabilização no eixo transversal passa por usar duas rodas, como o representado na Figura 2-5. Este veículo é um tanque com intuitos militares, possuindo uma armação de aço de 5 mm de espessura e deslocando-se por comando do condutor no seu interior.

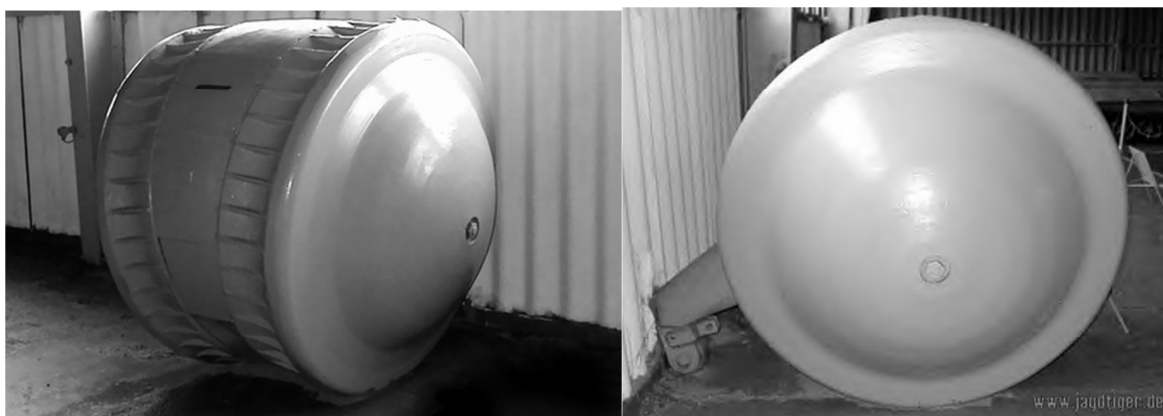


Figura 2-5: Tanque de reconhecimento de zona na Segunda Guerra Mundial (1945) [8].

Também no campo da exploração agrícola, houve tentativas de aplicação destas tipologias. Realçam-se duas soluções: o trator dentro da roda e o trator com uma única roda.

O funcionamento do trator dentro da roda, representado na Figura 2-6, corresponde a colocar o motor a fazer movimentar a roda em que está inserido por meio de uma ligação mecânica. Neste caso não existem problemas de aceleração ou de travagem, visto o equipamento ser munido de um braço de direção, peça que faz o acoplamento à charrua. A existência de este elemento externo ao motor proporciona estabilidade à máquina porque o centro de massa deixa de ser coincidente com o centro da roda, sendo deslocada para uma posição entre a roda e o utilizador.

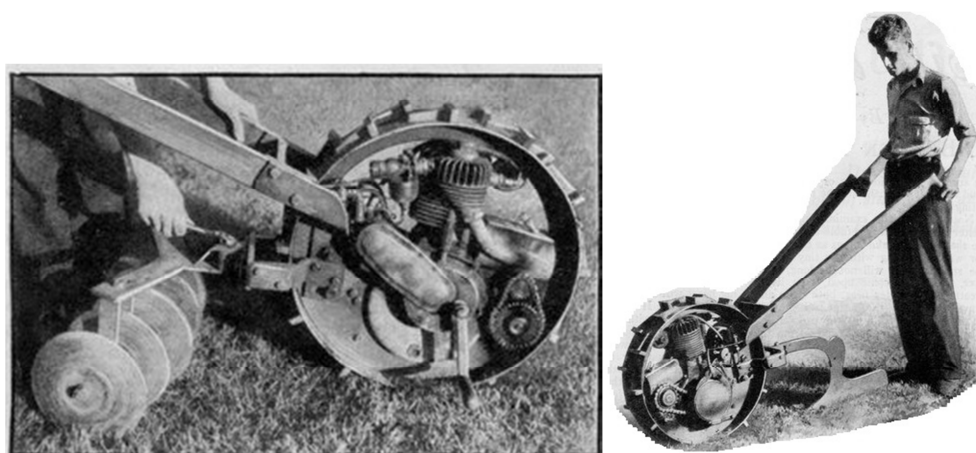


Figura 2-6: Trator dentro da roda (1933) [9].

Outro modelo de veículo que, depois de vários anos de pesquisa, foi implementado encontra-se representado na Figura 2-7.



Figura 2-7: Protótipo de trator, patenteado por Charles Tayler [10].

A construção do protótipo de trator com uma roda foi iniciada no ano de 1939 e tanto quanto se conhece, foi terminada em 1956, tendo sido patenteado quatro anos posteriormente [10].

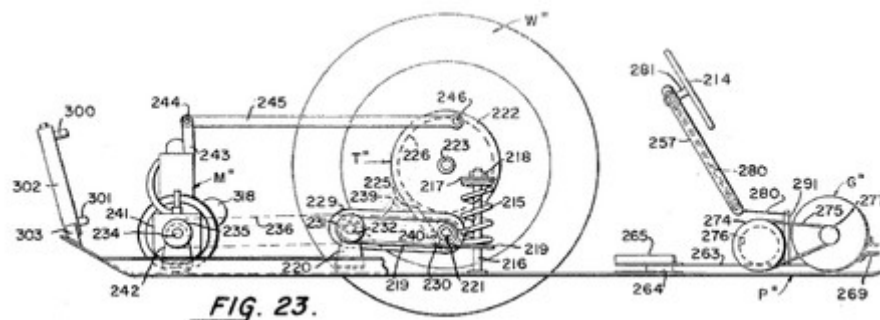


Figura 2-8: Projeto patenteado por Charles Tayler em 1960 [10].

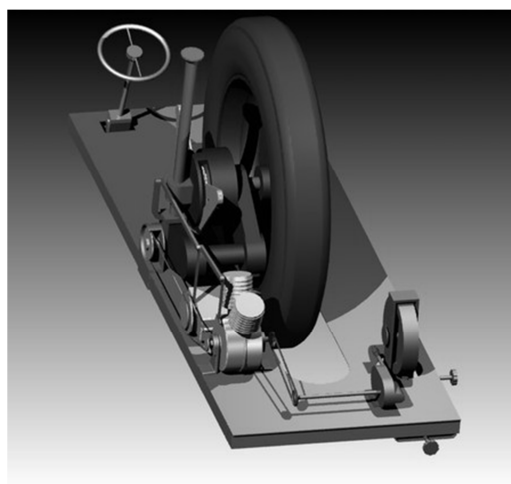


Figura 2-9: Modelo gráfico da patente [10] .

Esta patente abriu caminho à evolução no sentido de implementar um veículo para transporte pessoal, neste caso carro com uma única roda (Figura 2-10).

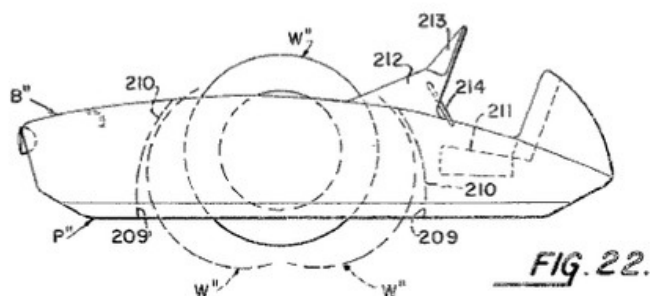


Figura 2-10: Modelo carro não patenteado pelo Charles Tayler em 1964 [10].

Atualmente nenhuma das configurações anteriormente referidas é comum em veículos de uso geral.

A configuração *monowheel* tem motivado inúmeros trabalhos ao longo do tempo. Em termos atuais, um inventor que se destaca, no desenvolvimento deste tipo de veículo é o Sr. Kerry McLean. A sua vida tem sido e continua a ser marcada por este tipo de veículos (Figura 2-11 e Figura 2-12).

Os projetos em causa têm diversos tipos de motor, desde para veículos mais pequenos, a de maiores dimensões e de velocidades de deslocamento elevadas.

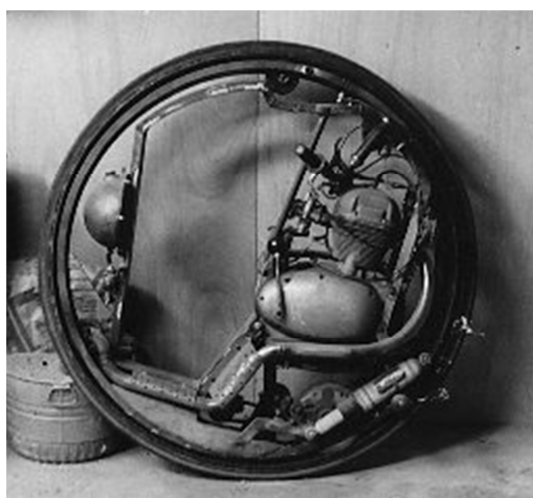


Figura 2-11: Um dos primeiros modelos construídos por McLean em 1971 [2].



Figura 2-12: Os modelos atuais de Monowheel que circulam em estrada [2] [11].

Atualmente está também em desenvolvimento na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Adelaide (Austrália), um veículo *Duo Wheel* denominado EDWARD [1] (Figura 2-13).



Figura 2-13: Projeto acadêmico, EDWARD, de Duo Wheel [1].

Capítulo 3 Conceitos Físicos

O principal objetivo deste capítulo é identificar as forças a que o veículo está sujeito. Estas influenciam as questões de equilíbrio e de movimentação do veículo.

Como foi já referido no Capítulo 1, o movimento do veículo é uma consequência do somatório de todas as forças que nele atuam.

Por este ser de formato “*Duo Wheel*”, a falta de equilíbrio lateral não existe neste modelo de conceção de veículo. A estabilidade é inerente, pois o centro de massa situa-se entre as duas rodas laterais.

A modelização deste tipo de veículo é extremamente complexa, não sendo por essa razão incluída no presente trabalho. O objetivo do trabalho foi a produção de um protótipo mecânico e a resolução dos vários problemas existentes em termos da cadeia de tração. De modo a testar as soluções desenvolvidas projetou-se todo o sistema eletrónico e de comando dos motores.

O veículo é um protótipo numa escala mais reduzida, em relação ao veículo final. Existirão assim diferenças em alguns componentes que não são escaláveis, como as baterias e os motores. Por este motivo remete-se para projetos futuros o estudo intensivo da cinemática e dinâmica do veículo.

3.1 Introdução à Cinemática do Veículo

O conceito de movimento é fundamental em qualquer processo físico. A cinemática é utilizada para analisar os deslocamentos decorrentes das forças aplicadas e o seu estudo normalmente efetuado no âmbito vetorial por oposição ao escalar.

3.1.1 Espaço Vetorial

Como o próprio nome indica, o espaço vetorial é definido como um espaço ou ambiente onde se articulam vetores.

Estes vetores podem assumir diversos comprimentos percentuais à força que representam.

3.1.1.1 Conceito de Deslocamento

A trajetória de um ponto material num sistema de referência determina em cada instante a sua posição em relação ao sistema de eixos escolhidos. No sentido de simplificar a análise, opta-se por utilizar um sistema de eixos em coordenadas ortogonais (retangulares).

O veículo é representado no sistema de eixos OXY como sendo um ponto, P , no instante t . A Figura 3-1 mostra a trajetória segundo os vetores de posição.

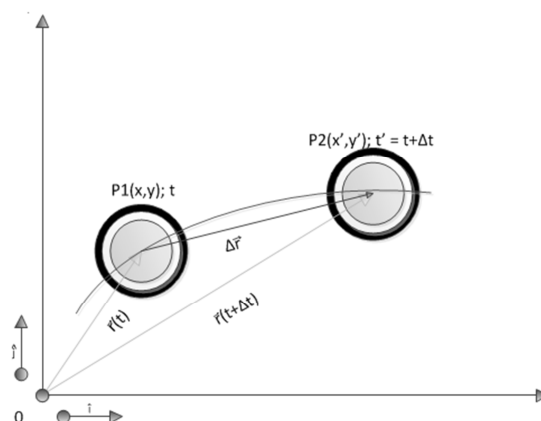


Figura 3-1: Representação da trajetória como sendo a variação do vetor posição.

Com o auxílio do vetor que tem origem em O e a extremidade ao ponto P , obtém-se o vetor posição ($\vec{r}(t) = \overrightarrow{OP}$), que em cada instante t , indica a posição do veículo em relação à origem do sistema de eixos. Em função das coordenadas (x, y) , de P e dos vetores unitários (\hat{i}, \hat{j}) , o sistema pode descreve-se como [12]:

$$\vec{r}(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} . \quad (3-1)$$

Ao longo do tempo o veículo apresenta um determinado deslocamento. Este é definido como tendo origem no ponto P_1 , no instante t , e terminando no ponto P_2 no instante t' , sendo $t' = t + \Delta t$.

No intervalo de tempo (Δt) o veículo moveu-se sobre o arco de circunferência $\widehat{P_1P_2}$, sendo o mesmo uma pequena parte da sua trajetória. O deslocamento efetuado é representado pelo vetor $\Delta\vec{r}$ representado na Figura 3-1 [12].

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \Delta\vec{r} = \vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t) \quad (3-2)$$

3.1.1.2 Conceito de Velocidade

A velocidade (\vec{v}) em cada instante (t) é uma das grandezas que caracteriza o movimento do ponto material. A definição de velocidade é a derivada do vetor posição em ordem ao tempo, tal como o descrito na equação (3-3).

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (3-3)$$

3.1.1.3 Conceito de Aceleração

Uma outra grandeza importante para definir o movimento é a aceleração (\vec{a}). A aceleração é a derivada da velocidade em ordem ao tempo tal como representado em (3-4) [12]:

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (3-4)$$

Como a velocidade é determinada à custa do deslocamento e a aceleração à custa da velocidade, então, com a substituição da equação (3-3) na equação (3-4) obtém-se a seguinte relação entre a aceleração e o deslocamento [12]:

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (3-5)$$

Pela análise da equação (3-5), a aceleração de um ponto material é a segunda derivada em ordem ao tempo do respetivo vetor posicional \vec{r} .

3.1.2 Espaço Escalar

Por questões de simplicidade de cálculo, cada uma das forças existentes será tratada em separado. Recorre-se assim ao conceito escalar por oposição ao espaço vetorial anteriormente referido.

A integração das diversas forças necessitará de ter em conta as suas direções, ou seja, um tratamento no espaço vetorial. Esta integração não será abordada no presente trabalho.

3.1.2.1 Conceito de Deslocamento

A variação de posição do ponto material sobre a trajetória, no intervalo de tempo Δt , denomina-se deslocamento sobre a trajetória, sendo representado pelo arco [12]:

$$\widehat{P_1P_2} = \Delta s = s(t') - s(t) . \quad (3-6)$$

Por vezes é necessário definir o que é o espaço percorrido (e_p). É o espaço total percorrido sobre a trajetória num determinado intervalo de tempo, desde que a mesma seja sempre no mesmo sentido. Esta definição por sua vez, no caso de haver inversão do sentido do movimento é definida da seguinte maneira [12]:

$$e_p = |\Delta s| . \quad (3-7)$$

Se durante o intervalo de tempo considerado houver $m-1$ inversões de sentido do movimento, temos então [12]:

$$e = \sum_{i=1}^m |\Delta s_i| . \quad (3-8)$$

3.1.2.2 Conceito de Velocidade

O conceito de velocidade tem a mesma caracterização que no caso de velocidade vetorial, no entanto, define-se como velocidade escalar média a seguinte grandeza [12]:

$$v_m = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s(t') - s(t)}{\Delta t} . \quad (3-9)$$

Os dados que se podem obter por esta expressão são pouco conclusivos, a média do deslocamento percorrido num certo tempo, quando o tempo é grande, não caracteriza a velocidade real. Para exemplificar, não se consegue definir se o corpo esteve parado metade do tempo tendo vindo a outra parte do tempo a circular ao dobro da velocidade média, ou se veio a velocidade constante durante todo o tempo. Conclui-se que, quanto menor o Δt a analisar, mais precisa é a informação obtida.

Para superar a ausência de precisão na informação, torna-se necessário definir o limite da velocidade escalar média quando Δt tender para zero, isto é a velocidade escalar no instante t , $v(t)$ [12]:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} . \quad (3-10)$$

Tanto $v(t)$ como v_m são grandezas escalares algébricas. Estas grandezas podem assumir valores positivos ou negativos.

A grandeza ou módulo da velocidade \vec{v} , ou seja $|\vec{v}|$, é dada por $\frac{|ds|}{dt}$, já que, quando Δt tende para zero, $\Delta \vec{r}$ tende para $d\vec{r}$ [12]:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \vec{r}| = |d\vec{r}| = |ds| . \quad (3-11)$$

Conclui-se que quando Δt tende para zero, o módulo da velocidade vetorial é igual ao módulo da velocidade escalar [12].

$$|\vec{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \frac{|d\vec{r}|}{dt} = \frac{|ds|}{dt} = |v| . \quad (3-12)$$

Subentende-se agora que, conhecendo as várias características do ponto material nos vários instantes (módulo, velocidade e sentido), dispõe-se de toda a informação sobre a maior ou menor rapidez no deslocamento, assim como sobre a variação da direção e sentido do mesmo.

3.1.2.3 Conceito de Aceleração

A velocidade de um ponto material varia de instante para instante. A grandeza que exprime esta variação vetorial é $\Delta \vec{v}$. A partir dela pode-se definir a aceleração escalar. Por definição, a aceleração do ponto material é a derivada em ordem ao tempo da velocidade (ou segunda derivada do respetivo vetor de posição). Com base na equação (3-5) pode deduzir-se [12]:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dr}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} . \quad (3-13)$$

A aceleração escalar não fornece toda a informação do movimento, esta traduz apenas a variação do módulo da velocidade.

3.2 Movimento Circular

As grandezas até agora utilizadas de deslocamento e espaço percorrido, de velocidade e de aceleração, são úteis quando o objetivo é descrever movimentos lineares. Na análise de movimentos circulares, devem-se introduzir as **grandezas angulares**.

3.2.1 Grandezas Angulares

As grandezas angulares têm características especiais e são sempre medidas em radianos. Podem-se identificar as seguintes grandezas [13]:

- Deslocamento angular: φ (phi)
- Velocidade angular: ω (ômega)
- Aceleração angular: α (alpha).

Com base na definição de radiano constata-se que:

$$\varphi = \frac{S}{R} . \quad (3-14)$$

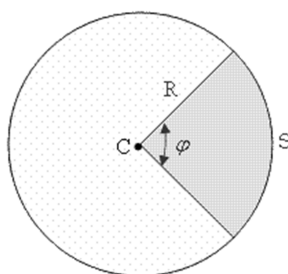


Figura 3-2: Representação da definição de radiano com base no círculo trigonométrico [13].

Usando a equação (3-14) pode-se concluir que, um rad (radiano) é o ângulo formado quando o seu arco **S** tem o mesmo comprimento que o raio **R**, de acordo com o representado na Figura 3-2.

Desta definição obtém-se a seguinte relação:

$$2\pi \text{ rad} = 360^\circ . \quad (3-15)$$

3.2.2 Deslocamento Angular ($\Delta\varphi$)

Analogamente ao deslocamento linear existe o deslocamento angular que pode ser calculado pela diferença entre a posição angular final e a posição angular inicial:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 . \quad (3-16)$$

Sendo:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta S}{R} . \quad (3-17)$$

Por convenção:

No sentido anti-horário o deslocamento angular é positivo.

No sentido horário o deslocamento angular é negativo.

3.2.3 Velocidade Angular (ω)

A velocidade angular média é calculada como o quociente entre o deslocamento angular e o intervalo de tempo do movimento [12]:

$$\omega_m = \frac{\Delta\varphi}{t} . \quad (3-18)$$

A unidade no Sistema Internacional é **rad/s**. São também correntemente utilizadas as seguintes unidades: rev/min (medido em rpm; rotações por minuto); rev/s (medido em Hertz).

Também é possível definir a velocidade angular instantânea como sendo o limite da velocidade angular média quando o intervalo de tempo tender para zero:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \omega_m . \quad (3-19)$$

3.2.4 Aceleração Angular (α)

Ao seguir a mesma analogia utilizada para a velocidade angular, define-se a aceleração angular média como:

$$\alpha_m = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} . \quad (3-20)$$

Tomando em consideração a equação (3-14) e explicitando-a em relação à variável S pode obter-se:

$$S = \varphi R . \quad (3-21)$$

Ao derivar ambos os termos da equação anterior em função do tempo obtém-se:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} R . \quad (3-22)$$

A derivada da posição em função do tempo é igual à velocidade linear e a derivada da posição angular em função do tempo é igual à velocidade angular, logo [12]:

$$v = \omega R . \quad (3-23)$$

Pode-se novamente derivar a igualdade anterior em função do tempo, obtendo-se:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d\omega}{dt} R . \quad (3-24)$$

A derivada da velocidade angular em função do tempo é igual à aceleração angular:

$$a = \alpha R . \quad (3-25)$$

Na Tabela 3-1 encontra-se representado o método de cálculo das variáveis lineares em função das suas correspondentes angulares.

Linear		Angular
S	=	φR
v	=	ωR
a	=	αR

Tabela 3-1 – Tabela de conversão das grandezas do movimento angular em movimento linear [13].

3.2.5 Período e Frequência

Período (T) é o intervalo de tempo mínimo para que um fenómeno cíclico se repita. A sua unidade é a unidade de tempo (segundo, minuto, hora).

Frequência (f) é o número de vezes que um fenómeno ocorre numa unidade de tempo. A unidade mais comum é o Hertz (1Hz=1ciclo/s). No movimento circular a frequência equivale ao número de rotações por segundo.

Frequentemente é necessário converter rotações por segundo para rad/s. Estas grandezas relacionam-se de acordo com:

$$\omega = 2\pi f . \quad (3-26)$$

3.2.6 Movimento Circular Uniforme

Um corpo está em Movimento Curvilíneo Uniforme (MCU) se a sua trajetória for descrita por um círculo com um "eixo de rotação" a uma distância R , e a sua velocidade for constante, ou seja, permanece a mesma em todos os pontos do percurso.

Embora a velocidade linear seja constante, ela sofre permanentemente uma mudança de direção, logo existe uma aceleração, mas como esta aceleração não influencia no módulo da velocidade, chama-se a essa aceleração de **aceleração centrípeta**.

A aceleração centrípeta relaciona-se com a velocidade angular da seguinte forma:

$$a_{cp} = \frac{v^2}{R} , \text{ com: } v = \omega R . \quad (3-27)$$

Através do desenvolvimento da equação (3-27), pode obter-se:

$$a_{cp} = \frac{(\omega R)^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} . \quad (3-28)$$

Ao reduzir ao mesmo denominador ambas as parcelas, obtém-se:

$$a_{cp} = \omega^2 R . \quad (3-29)$$

3.2.7 Movimento Circular Uniformemente Variado

Quando um corpo, que descreve uma trajetória circular, sofre uma mudança de velocidade angular, então este corpo possui uma aceleração angular (α).

As formas angulares das equações do Movimento Curvilíneo Uniformemente Variado (MCUV) são obtidas a partir das equações do movimento retilíneo uniformemente variado quando divididas pelo raio R da trajetória em que se movimenta o corpo, tal como representado na Tabela 3-2.

MUV	MCUV
Grandezas lineares	Grandezas angulares
$v = v_0 + at$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$
$S = S_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$
$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	$\alpha_m = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$
$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta S$	$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\Delta\varphi$

Tabela 3-2 – Tabela de conversão das equações entre MCU e MCV [13].

A aceleração resultante é dada pela soma vetorial da aceleração tangencial e da aceleração centrípeta tal como representado (Figura 3-3):

$$\vec{a}_y = \vec{a}_t + \vec{a}_{cp} \quad , \quad (3-30)$$

$$|\vec{a}_y| = \sqrt{|\vec{a}_t|^2 + |\vec{a}_{cp}|^2} \quad , \quad (3-31)$$

$$|\vec{a}_y| = \sqrt{(\alpha R)^2 + (\omega^2 R)^2} \quad . \quad (3-32)$$

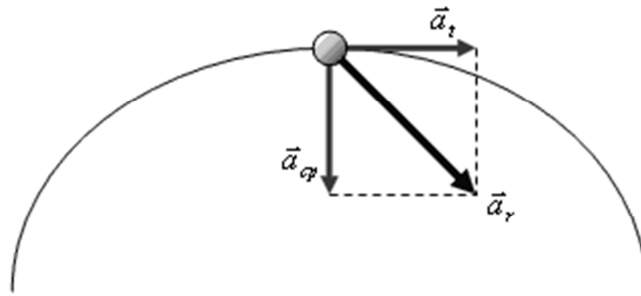


Figura 3-3: Representação da aceleração resultante (\vec{a}) [13].

3.3 Conceito de Força

No âmbito da Física, uma força é o que modifica o estado de movimento de um corpo material. Este conceito é descrito através da segunda lei da Newton [12] [14].

“A resultante das forças, \vec{F} , exercidas sobre um corpo (ponto material) comunica-lhe uma aceleração \vec{a} , proporcional a essa resultante. A constante de proporcionalidade é a massa de inércia, m , do corpo.”

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = m \times \vec{a}.$$

3.3.1 Força (F)

Quando uma força atua sobre um determinado corpo provoca uma aceleração que depende da massa deste de acordo com:

$$F = m \times a. \quad (3-33)$$

A aceleração é definida como a variação da velocidade num intervalo de tempo, segundo a seguinte equação:

$$a = \frac{\Delta V}{t}. \quad (3-34)$$

Substituindo a equação (3-34) na (3-33) então a força pode ser determinada por:

$$F = m \times \frac{\Delta V}{t} . \quad (3-35)$$

3.3.2 Força da Gravidade (Fg)

A força da gravidade na Terra é a força de atração exercida pelo planeta sobre um determinado corpo. A aceleração gravítica terrestre é aproximadamente de 9,82m/s (próximo da superfície) conforme referenciado na Figura 3-4.

Corpo celeste	Em relação à Terra	m/s ²
<u>Sol</u>	27,9	274,1
<u>Mercúrio</u>	0,377	3,703
<u>Vênus</u>	0,9032	8,872
<u>Terra</u>	1 (por definição)	9,8226
<u>Lua</u>	0,1655	1,625
<u>Marte</u>	0,3895	3,728
<u>Júpiter</u>	2,64	25,93
<u>Saturno</u>	1,139	11,19
<u>Urano</u>	0,917	9,01
<u>Netuno</u>	1,148	11,28

Tabela 3-3 – Valores da aceleração gravitacional [15] .

Como a força gravítica tem sentido inverso ao vetor j (Figura 3-1), isso implica que a equação (3-33) sofra alterações.

A aceleração e a aceleração gravitacional têm a seguinte relação entre elas:

$$a = g . \quad (3-36)$$

Ou seja a força gravítica pode ser definida por:

$$F_g = m \times g . \quad (3-37)$$

Esta força é muitas vezes denominada de peso (P) [16] [17].

3.3.3 Força de Atrito (F_a)

A força de atrito é uma força que se opõe ao movimento.

As forças de atrito tomam um papel importante na generalidade dos processos. Por um lado estas provocam desgaste nas peças móveis das máquinas (aumento de energia interna, ou temperatura) [18]. Por outro lado, sem atrito não haveria transmissão do movimento por correias, não se poderia caminhar, nem segurar uma caneta, ou até mesmo escrever.

A força de atrito consiste na força existente na superfície de contacto entre dois corpos. A força de atrito define-se com base no coeficiente de atrito [18].

3.3.3.1 Coeficiente de Atrito

O valor do coeficiente de atrito depende do grau de rugosidade das superfícies de contacto entre os dois corpos. Esta é uma grandeza adimensional [18]. O coeficiente de atrito pode ser estático ou dinâmico.

O coeficiente de atrito dinâmico (μ_c), existe a partir do momento em que as superfícies em contato apresentam movimento relativo. Este relaciona a força de atrito presente nos corpos que se encontram em movimento com o módulo das forças normais que neles atuam.

O coeficiente de atrito estático (μ_e) existe quando as superfícies em contato não têm movimento relativo.

Comparando os módulos dos dois coeficientes, no contato entre superfícies sólidas o coeficiente de atrito dinâmico será sempre menor (mas não necessariamente muito menor) que o coeficiente de atrito estático.

$$\mu_c \leq \mu_e \quad (3-38)$$

3.3.3.2 Força de Atrito Dinâmico

A força de atrito dinâmico é a força existente entre as superfícies de dois corpos que apresentam movimento de deslizamento entre si. A força de atrito dinâmico opõe-se

sempre ao movimento. A força de atrito é importante para manter a tração entre o pneu do veículo e o piso.

A força de atrito dinâmico (F_{ad}) pode ser calculada pela seguinte expressão [18]:

$$F_{ad} = \mu_c \times N . \quad (3-39)$$

Onde F_{ad} é medida em Newtons, μ_c é o coeficiente de atrito (dinâmico) e N a força na direção normal do movimento. No caso de o corpo estar no plano horizontal possui a mesma intensidade do peso do corpo, ou seja,

$$N = P = m \times g . \quad (3-40)$$

No caso de o corpo estar no plano inclinado é necessário obter a projeção destes nos eixos convenientes de acordo com o representado na Figura 3-4.

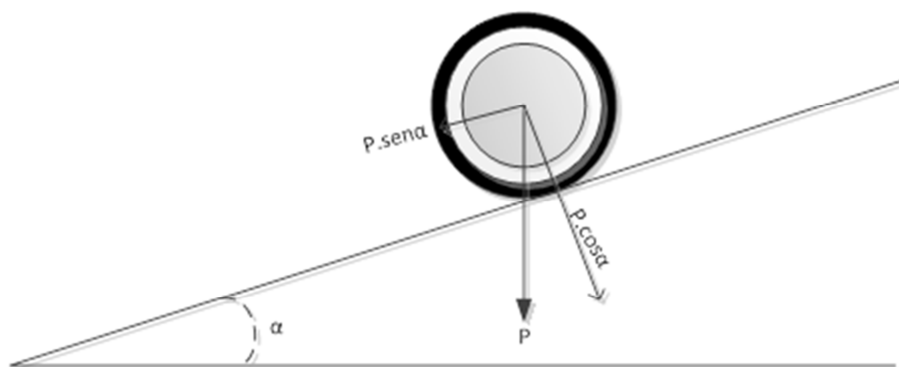


Figura 3-4: Representação da força Peso (P).

Onde α representa a inclinação da via.

3.3.3.3 Força de Atrito Estático

A força de atrito estático (F_{ae}) é a força que pode existir entre duas superfícies sem que estas deslizem uma sobre a outra.

Quando se tenta empurrar um corpo em repouso em relação ao solo, verifica-se que se pode gradualmente ir aumentando a força sobre o corpo sem que este se mova. A força de atrito estático opõe-se à força aplicada sobre o corpo, sendo a sua soma nula. Deste modo,

ele mantém-se em repouso. Há, no entanto, uma força limite que se pode aplicar no corpo sem que este se mova.

Matematicamente a força de atrito estático relaciona-se com a força normal mediante a seguinte equação [18]:

$$|F_{a_e \text{ máx}}| = \mu_e \times N . \quad (3-41)$$

3.3.4 Força de Resistência ao Rolamento (F_{rr})

A força de resistência ao rolamento (F_{rr}) é a força que se opõe ao rolar de um corpo sobre uma superfície. Esta força é calculada através do coeficiente (f_r) denominado de coeficiente de resistência ao rolamento. No caso de um veículo, este varia com o modelo do pneu e do tipo de via ou asfalto e com as irregularidades existentes.

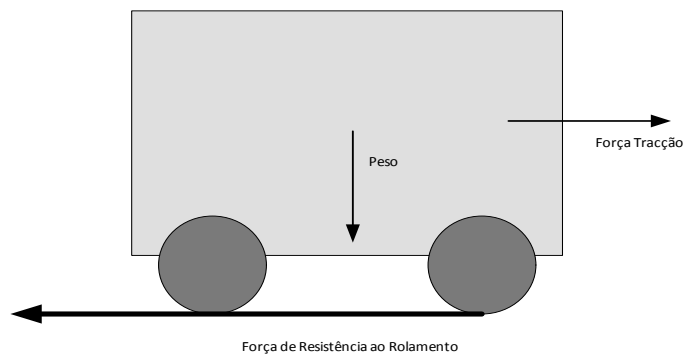


Figura 3-5: Representação da força de resistência ao rolamento.

A força de resistência ao rolamento pode ser expressa por [16] [19]:

$$F_{rr} = f_r \times P . \quad (3-42)$$

O coeficiente f_r apesar de poder ser tabelado aos diversos pisos [20], esse valor será sempre uma aproximação grosseira do valor real.

3.3.5 Força de Resistência Aerodinâmica (F_{da})

Com a passagem do ar no veículo, cria-se uma força que se designa por F_{da} . Esta força decompõe-se nos vários eixos (longitudinais, laterais e verticais).

A forma de como o ar deriva sobre o veículo é excessivamente complexa, de onde se desenvolve alguns modelos experimentais para representar este efeito. De uma forma aproximada, a resistência aerodinâmica pode ser caracterizada pela seguinte equação [14]:

$$F_{da} = \frac{1}{2} \rho \times c_d \times A_f \times v_v^2. \quad (3-43)$$

Com a seguinte definição de parâmetros:

c_d é o coeficiente de aerodinâmica;

F_{da} é a força de resistência aerodinâmica, a qual é por definição a componente de força na direção da velocidade de fluxo;

ρ é a densidade de massa do fluido;

v_v é a velocidade do corpo relativamente ao fluido;

A_f é a área frontal de referência.

3.3.6 Força Resultante (F_r)

A força resultante é proveniente do somatório de todas as componentes de forças nos diversos eixos.

Deste resulta uma deslocação resultante, que irá perturbar o sistema. Por consequência, o sistema se moverá para equilibrar.

Capítulo 4 Estrutura Mecânica

Este capítulo descreve a implementação, ao nível da estrutura mecânica, de um protótipo de um veículo elétrico inovador que explora as técnicas de construção apresentadas no estado da arte. As principais opções de projeto, a estrutura mecânica, os aspetos da construção, *design*, concepção e acabamentos serão aqui abordadas e justificadas.

A arquitetura adotada neste projeto segue o conceito do veículo dentro da roda, que ao nível de estrutura física, coloca o utilizador dentro da roda.

Como foi mencionado no Capítulo 3, esta aproximação requer essencialmente o conhecimento das forças resultantes e a localização dos pesos e cargas dentro do veículo.

Para o estudo e desenvolvimento do método proposto, foi concebido um protótipo de veículo a uma escala menor que o sistema real para que o mesmo possa ser usado para ensaios, testes e avaliação de desempenho. Em consequência disto, o protótipo não reserva espaço para o utilizador. Orientado sob o princípio de uma prática ambiental, toda a estrutura foi desenvolvida baseando-se em materiais recicláveis e reaproveitados.

Ao trabalhar no protótipo desprezam-se os cálculos de resistência dos equipamentos às forças aplicadas. Fica assim aberta uma área para trabalho futuro que explore o dimensionamento de equipamento à escala real com os pesos reais e espaço para o utilizador no seu interior.

A construção do protótipo, para ensaios tem as seguintes características:

- Baixo custo.
- Reaproveitamento de materiais.
- Uso de rolamentos e rodas de linha branca;

O critério de seleção dos equipamentos passou pela constante preocupação da redução dos custos, assim o dimensionamento dos motores e das baterias foram adaptados à escala adotada.

4.1 Conceito de deslocamento Motor/Roda.

A generalidade dos veículos de utilização comum tem características semelhantes, desde o método de direção (volante), bem como o método de deslocamento (motor a criar rotação ao eixo de transmissão e este por sua vez transmitir essa mesma força para a roda). Outro ponto notável é o da existência de uma roda de direção.

No conceito de motor/roda justapostos num só e em que o utilizador seja transportado no interior da mesma roda, permite que seja necessário um menor espaço para alterar a direção. Este conceito foi implementado na construção de um protótipo que servirá para testar as capacidades físicas, eletrónicas e funcionais. De seguida explora-se a ideia e os métodos de acoplamento da roda com o motor.

Para a produção de valores realísticos das forças e os efeitos das mesmas relativamente a um futuro veículo em escala real, manteve-se o centro de massa do veículo deslocado do centro geométrico dele. É com base neste facto que se efetua o deslocamento do veículo (deslocamento por desequilíbrio do centro de massa).

Este modelo de roda, motor e pessoa, justapostos só é possível com uso de vários “aros” alinhados e configurados. A configuração de centragem tem de ter pelo menos três pontos de “fixação”, que neste caso são três pontos de apoio móvel, como mostra a Figura 4-1.



Figura 4-1: Primeira aproximação do sistema de centralização e deslocamento interno da roda

Com uma circunferência completa (360°) apoiada por 3 pontos (Figura 4-1), obtém-se um ângulo entre pontos de apoio de 120°.

No caso de se pretenderem menores folgas no acoplamento de todo o veículo, pode-se aumentar o número de apoios, o que reduz o ângulo entre eles, criando assim uma redução considerável na força de torção exercida em cada apoio.

A Figura 4-1 representa a primeira concepção de roda única dentro de outra. A sua concepção contém; dois aros de roda de bicicleta de tamanhos diferentes, sinoblocos, anilhas, varão roscado e porcas M6 com aba.

4.2 Equipamentos Adaptados

Os equipamentos adaptados são propriedade do Politécnico, dos quais se faz uso para desenvolvimento do projeto. O projeto, como foi referido anteriormente, é de escala reduzida e por isso o dimensionamento dos equipamentos selecionados foi adaptado a esta escala.

As baterias podem apresentar um comportamento diferente, com maior relevância ao nível de autonomia. No caso dos motores, um comportamento diferente vai, sobretudo, ter influência na capacidade/velocidade de deslocamento do centro de massa do sistema.

4.2.1 Baterias

Como não existem critérios mínimos ou máximos de tempos de funcionamento sem ser necessário recorrer a carregamentos, faz-se uso de baterias existentes com o modelo NPC24-12I – 12V – 24Ah (bateria sem manutenção de chumbo/ácido de válvula regulada apresentada na Figura 4-2) da marca YUASA, preparadas para descargas profundas e cíclicas. Para satisfazer as necessidades do protótipo foram acopladas dois elementos em série para perfazer os 24V, com capacidade de 1152Wh.



Figura 4-2: Bateria Yuasa NPC24-12I [21] [22].

As características físicas e elétricas são apresentadas na Tabela 4-1 e na Figura 4-3 as quais mostram a capacidade máxima da bateria dependendo do número de ciclos de

carga/descarga e da profundidade das descargas (DOD – *Depth Of Discharge*). Verifica-se que para se conseguir um número de ciclos superior a um mínimo aceitável de 500/600 ciclos, a bateria não deve descarregar abaixo de 20/25% da sua capacidade. Para valores abaixo desta percentagem a bateria irá apresentar uma degradação mais rápida.

NPC Model	Volts	Rated Capacity (20 hr rate) (Ah)	Approx. Dimensions			Weight
			Length	Width	Overall height incl. terminals	
NPC24 - 12I	12	24	175mm	166mm	125mm	8.8kg

Tabela 4-1 – Tabela de características da bateria [22].

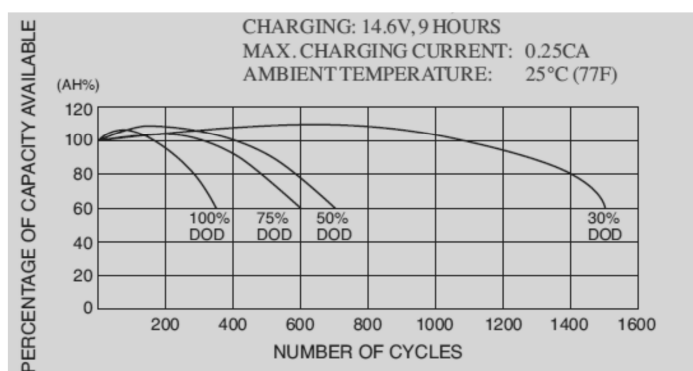


Figura 4-3: Característica da capacidade versus número de ciclos [22].

4.2.2 Motores

A potência mecânica será então fornecida por dois motores DC de 24V de 400W (motor por roda) adquiridos no mercado (Figura 4-4). Considera-se o valor total para a potência mecânica fornecida pelo conjunto dos dois motores de:

$$P_m = 2 \times 400W = 800W \quad (4-1)$$



Figura 4-4: Motor MY1018E-300-400W [23].

As características principais do motor existente podem ser consultadas na Tabela 4-2 e no gráfico da *Figura 4-5*.

Nível de carga	Binário/Nm	Velocidade/rpm	Pmec./W	Tensão/V	Corrente/A	Pelec/W	Rendimento/%
Sem carga	0.03	2635	8.40	24.12	1.84	44.38	18.93
Máx. eficiência	1.11	2413	281.60	24.12	14.03	338.50	83.19
Carga equilibrada	1.68	2274	400.28	24.24	21.17	513.12	78.01
Binário máximo	2.69	2069	581.87	24.35	32.99	803.35	72.43

Tabela 4-2 – Tabela de características do motor [23].

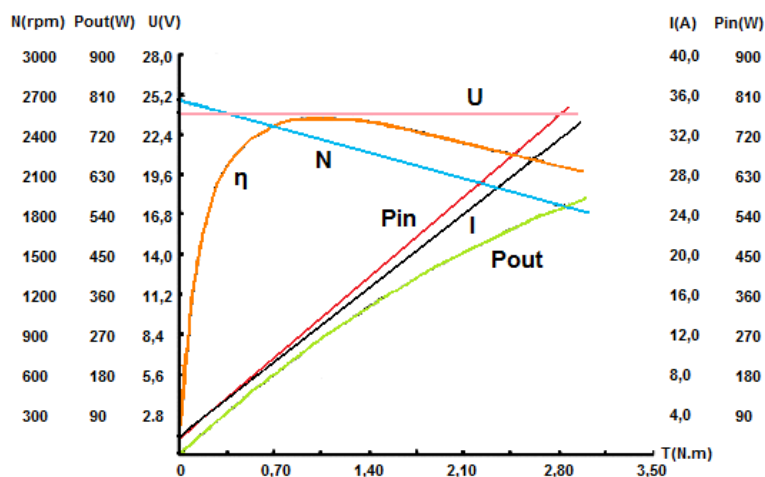


Figura 4-5: Gráfico das características do motor [23].

4.3 Construção por partes

A estrutura física principal tem de ter em consideração alguns pontos importantes adjacentes à sua conceção, como a distribuição dos pesos dos equipamentos, e o volume ocupado pelos mesmos. Estes pontos, no protótipo, são os motores e as baterias.

A primeira conceção do sistema de roda, por mais simples que tenha sido, demonstrou um ponto interessante, da velocidade que atingia a roda exterior sem fazer grandes perturbações (força) na roda interior (habitáculo). Assim o interesse nasce nesta nova forma de se movimentar, mas os métodos de construção somente em estrutura metálica de

amortecimento, fazem que a mesma seja um sistema demasiado ruidoso e com várias folgas.

Tendo em vista a diminuição do nível de ruídos e em parte a redução das folgas nos pontos de apoio, foram adicionados ao sistema um amortecimento (borrachas) e rolamentos blindados.

As alterações da estrutura e os testes comportamentais foram constantes ao longo do processo de desenvolvimento, como se pode visualizar na Figura 4-6. Para tornar o veículo mais eficiente foram trocados os sinoblocos por rodas de borracha e passou a utilizar-se rolamentos apropriados à dimensão dos veios e encaixes das rodas.

4.3.1 Roda Dentro da Própria Roda

A ideia geral de funcionamento do veículo passa por colocar um sistema de roda dentro de outra roda, o que faz que uma das rodas se torne em habitáculo e a outra, a roda envolvente, seja a roda de deslocamento.

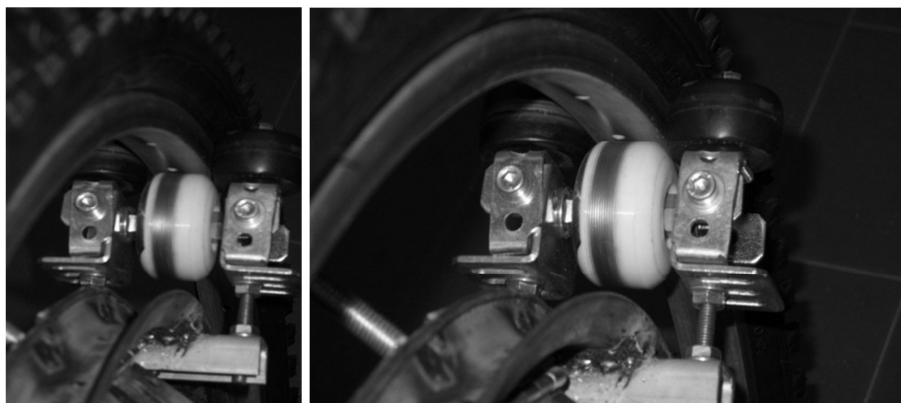


Figura 4-6: Abordagem de acoplamento Veículo/Roda, sem tração.

Como se trata de um acoplamento mecânico de elevado nível de desgaste e de elevada importância, todas as peças desenvolvidas e as ideias implementadas são preparadas para uma boa resposta a nível de funcionamento com o uso de ajustamento por aperto.

O veículo, segundo os dados já demonstrados, é um veículo equilibrado. O habitáculo não está imóvel, mas a estabilidade do veículo confere ao habitáculo a tendência constante ao ponto inicial de equilíbrio.

4.3.2 Preparação dos Motores

A preparação dos motores passa por remover a roda dentada do eixo do motor, por meio do uso de uma prensa hidráulica (Figura 4-7). Para a redução de folgas e do desalinhamento do motor com a roda, o motor é fixo diretamente à estrutura. Este ponto de rotação representa um ponto de apoio entre rodas. Os outros dois pontos são flexíveis, ou seja, com possibilidade de ajuste.

O veio do motor, ao ser um veio com castelo, é adaptado com um sistema para fixação da roda de borracha ao próprio eixo do motor.



Figura 4-7: Remoção a roda dentada do eixo do motor.

4.3.3 Alinhamento do Ângulo “Sopé” e Direção

Prever o ângulo sopé traz grandes benefícios na estabilidade do veículo [19].

O ângulo sopé é a inclinação da roda de um veículo em relação ao plano horizontal (Figura 4-8). O seu valor é denominado pelo ângulo de sopé (camber) e será positivo (+) quando a parte superior da roda se inclinar para fora e negativo (-) quando ela se inclinar para dentro. Este ajuste, de um modo geral, controla as características de rolamento das rodas. O ângulo sopé estando fora dos valores originais do veículo, pode causar desgaste irregular dos pneus, perda da estabilidade e aumento do consumo. Quando os valores de camber entre as rodas possuem mais do que um grau de diferença, o veículo pode apresentar tendência a deriva (puxando) para um dos lados [24].

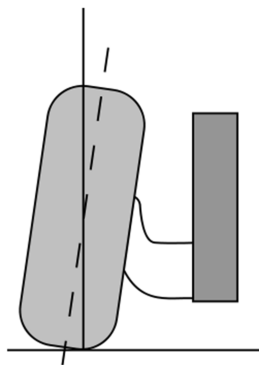


Figura 4-8: Ângulo de Sopé [24].

No entanto, uma estrutura desportiva trabalha com valores e ângulos de sopé diferentes.

Para o estudo das características e respostas a vários ângulos de sopé possíveis, a estrutura sofreu a adaptação de sistemas que possibilitam a variação do angulo sopé facilmente. O uso de varão roscado, dobradiças e porcas em locais específicos auxiliam a alteração rápida do angulo sopé.

Os testes reais realizados deram várias respostas sobre a utilização de diversos ângulos sopé.

Em conclusão, o uso de uma imagem mais desportiva (Figura 4-9), correspondente a um elevado ângulo sopé, não acrescenta valor e características ao veículo, sendo assim, é implementado uma versão com ângulo sopé de 0°.



Figura 4-9: Veículo com ângulo sopé desportivo, em fase de testes.

A mais-valia do angulo sopé a 0°, passa pelo maior espaço útil a ser usufruído pelo utilizador em relação a qualquer outro angulo.

4.3.4 Alinhamento e Solidificação de Toda a Estrutura

Com base nos resultados experimentais obtidos anteriormente decidiu-se qual o alinhamento da estrutura para que esta assuma uma posição fixa. Os pontos importantes a ter em consideração são: a inclinação das rodas e a disposição dos pontos de apoio entre roda e veículo.

A estrutura é á base de ferro. A união de toda a estrutura é feita por método de soldadura por electrodo, que apresenta ser uma boa solução com rápida aplicação e de longa duração.

Para a aplicação da soldadura recorreu-se a um aparelho de soldar eletrónico (inverter). Estes tipos de aparelho têm grandes capacidades de soldar estruturas finas, como no caso do veículo em causa. O aparelho efetua um controlo de corrente mais eficaz possibilitando uma soldadura mais resistente e limpa que os aparelhos de soldar convencionais.

O aparelho de soldar convencional aplica a tensão sinusoidal numa bobine, eleva a tensão e aplica-a quase diretamente às garras (massa e o electrodo). O aparelho de soldar eletrónico, converte a tensão de entrada sinusoidal em tensão DC, aplica modulação em PWM e envia-a para as garras em DC modulado.

No ato de soldar, as peças tem tendências para se deslocar e assumir pontos e posições diferentes do pretendido pelo que foi necessário fixar temporariamente algumas das peças.

Após a soldadura é fundamental a nova medição e retificação das peças de forma a garantir a estabilidade do veículo, conforme o representado na Figura 4-10.

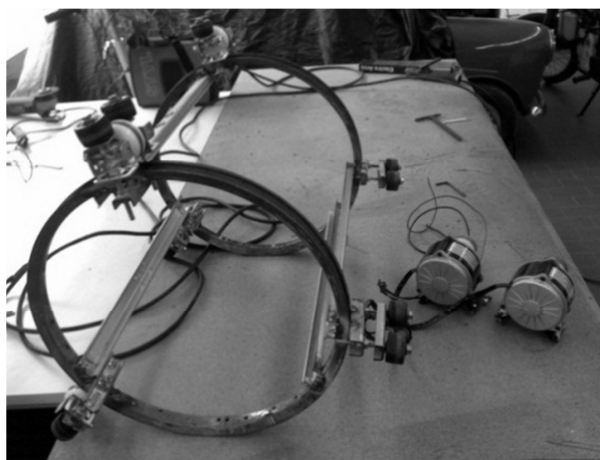


Figura 4-10: Acerto do ângulo sopé no veículo.

A estrutura foi dimensionada para assumir um ângulo sopé de 0° e foi construída por meio de três perfis DIM, com as mesmas dimensões entre si.

A convergência total é dada no ângulo formado pelo prolongamento de duas linhas representativas dos planos das duas rodas, por isso, o mesmo, só é nulo quando as linhas estão paralelamente uma à outra.

O passo seguinte é a montagem da roda de tração sobre a estrutura atual (Figura 4-11), que é neste momento a estrutura para as rodas. Com o acoplamento roda e estrutura, o veículo começa a ter meio de deslocamento próprio, deixa de ser um objeto imóvel.



Figura 4-11: Montagem das rodas.

4.3.5 Base Suporte Baterias

O suporte de baterias é construído à medida (400mm * 180mm), em cantoneira em L de 25 mm (Figura 4-12). A fixação da parte superior do suporte de baterias é feita mediante 4 parafusos métricos M10 com 160mm. Com base nesta medida de comprimento *standard*, o parafuso foi construído em varão roscado e porca. A porca é soldada na extremidade de cada pedaço de varão, tornando-se assim uma única peça, conforme a Figura 4-13.

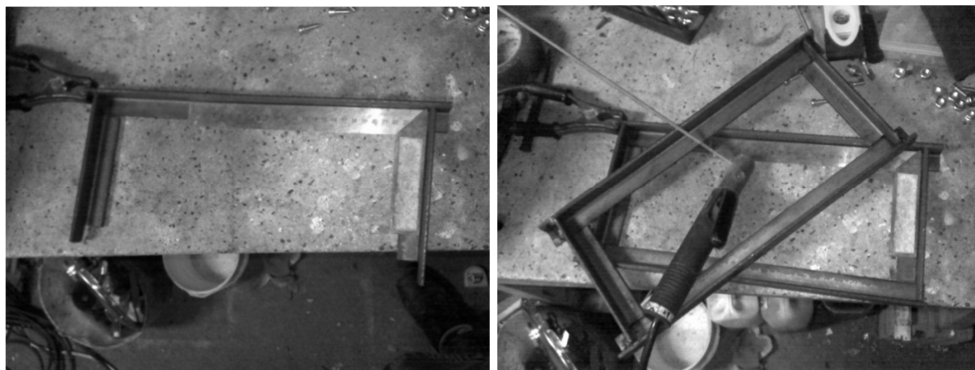


Figura 4-12: Construção do suporte de baterias.



Figura 4-13: Construção dos parafusos para suporte de baterias.

4.3.6 Tratamento Antiferrugem

Antes de aplicar este tratamento, a correção da estética passa por prever a imagem final do veículo pretendido. Será necessário ter em atenção os alinhamentos e nivelamentos da estrutura com os futuros visores do veículo (Figura 4-14). O protótipo, para poder assumir o alinhamento da Figura 4-14, tem de sofrer novas alterações. O ponto de equilíbrio do veículo faz com que no meio de cada visor esteja uma calha da estrutura principal.

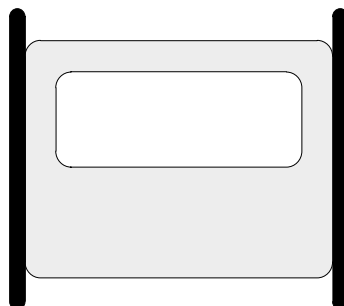


Figura 4-14: Alinhamento dos futuros visores do veículo.

A solução passa por reforçar a estrutura nos pontos não visíveis pelos visores e cortar posteriormente as barras no espaço dos visores (Figura 4-15).

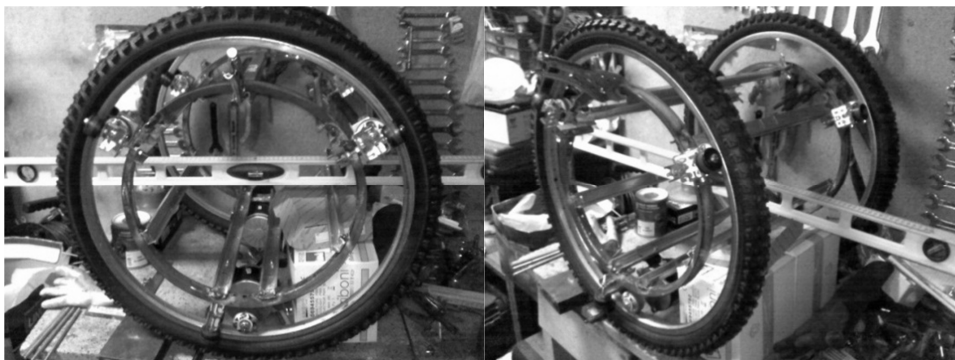


Figura 4-15: Alinhamento dos futuros visores do veículo.

Depois de estarem construídas todas as partes mecânicas do veículo, procedeu-se à aplicação dos tratamentos antiferrugem. O tratamento antiferrugem passa primeiro por remover todos os indícios de ferrugem (Figura 4-16), neste caso com o auxílio de ferramentas mecânicas (rebarbadoras e discos de rebarbar).

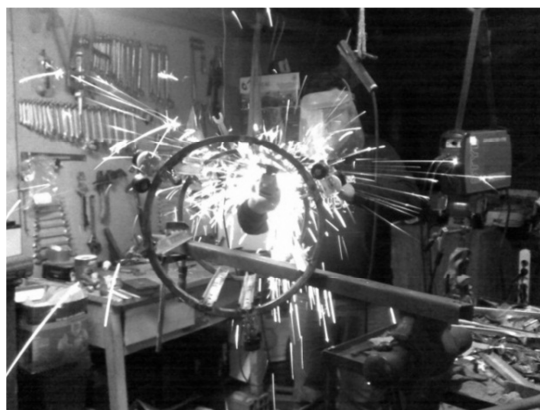


Figura 4-16: Processo de remoção de ferrugem.

Teve de se ter alguns cuidados para proteger as peças que não são para aplicar o tratamento (Figura 4-17).

Este processo é concluído pela aplicação do produto de tratamento que, devido ao material utilizado na estrutura, é um tratamento de zinco por *spray*, com características duradouras, eficazes e de rápida secagem.

Conforme se pode ver na Figura 4-18, o tratamento de zinco é de cor cinza, com aspeto brilhante, que além de proteger o ferro da corrosão, também confere uma agradável imagem ao veículo (Figura 4-18).



Figura 4-17: Isolamento das peças a não pintar.



Figura 4-18: Material já com tratamento de Zinco.

Após o tempo de secagem, na ordem dos 10 minutos, iniciou-se a montagem e alinhamento de todos os componentes (Figura 4-19 e Figura 4-20).



Figura 4-19: Montagem das Rodas.

Assim se termina mais um passo na concepção do veículo, que apresenta uma estrutura sólida, mas sem uma estética comercial (ver Figura 4-20 e Figura 4-21), passo a ser tratado nas secções seguintes.

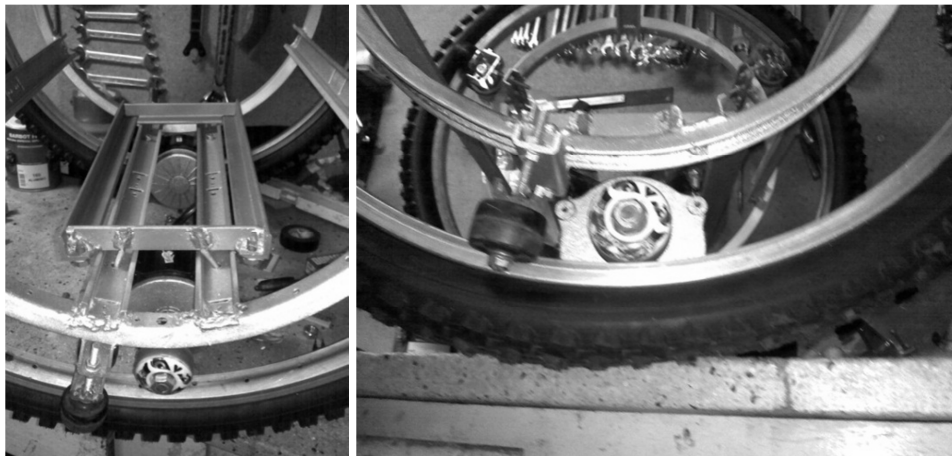


Figura 4-20: Montagem de Tabuleiro das baterias e Motor de tração.

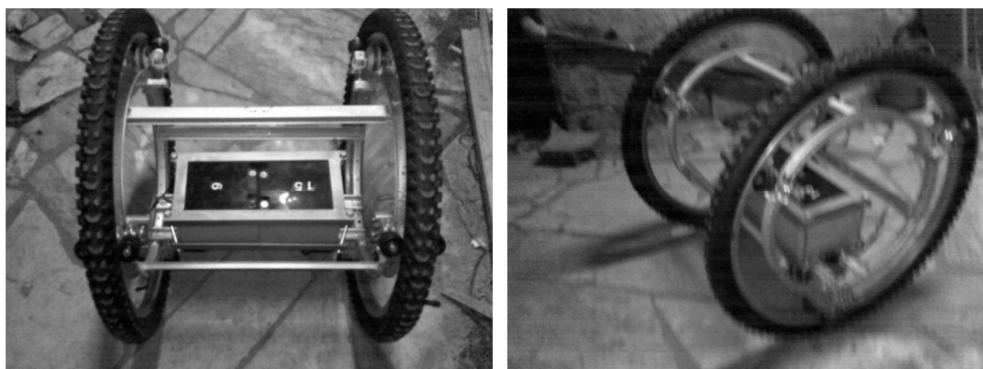


Figura 4-21: Veículo em estrutura sólida.

4.4 Fibragem e Pintura

O protótipo do veículo poderá assumir várias configurações e formatos. No entanto pretende-se que o mesmo possua um espaço fechado para que num futuro, o mesmo espaço reservado possa transportar pelo menos uma pessoa. Por essa razão, a estrutura do protótipo implementado assume uma configuração fechada, implementada numa base de fibra.

A aplicação de protótipos baseados em fibra tem várias vantagens em relação ao uso convencional da chapa de ferro. O uso de chapa de ferro, em caso de acidente/choque, tem

de ser desamolgado, esticado, preenchido no caso de ter buracos ou falhas e depois pintado. No caso da fibra, a reparação apresenta processos mais fáceis.

4.4.1 Preparação da Fibra em Placa

Em geral, há dois processos para aplicar a fibra. Um método usa diretamente a manta de fibra virgem sobre o molde, onde será depois coberto de resina com um produto endurecedor (neste caso será irregular). O segundo método passa por primeiro converter a manta virgem em manta de fibra já com uma pequena camada de resina (espalha-se em cima de uma estrutura direita, para criar uma manta direita).

Durante a aplicação é usada manta virgem para reforçar cantos e fixações.

A fibragem tem uma grande utilidade na conceção de várias componentes de um automóvel como: para-choques; painéis laterais; capô e também diversos painéis para veículos de competição. A aplicabilidade deve-se às suas excelentes características finais de moldagem, de possuir menor peso que a chapa convencional, grande resistência e facilidade de reparação no caso de ficar danificado e por isso é considerado um material de eleição para veículos desportivos.

No caso do protótipo implementado neste projeto, não foi desenvolvido molde, porque a estrutura do protótipo é o próprio molde do veículo. Neste caso, aplica-se a manta virgem em superfície plana que é depois banhada com a solução de resina e endurecedor, como se pode observar na Figura 4-22.

Esta é uma etapa que converte a placa de uma textura irregular a lisa e simétrica.



Figura 4-22: Placa fibra ainda em tratamento.

4.4.2 Moldagem e Fixação

O processo de moldagem e fixação trata de criar e atribuir um novo formato à placa de fibra. Esta nova forma é previamente preparada e testada, sendo a sua fixação feita, depois da placa de fibra estar na sua posição final, com manta virgem de fibra e resina a percorrer todo o interior do protótipo. A resina com o endurecedor tem de ser espalhado com pincel de modo a fazer embeber toda a manta com uma camada uniforme da solução, como mostra a Figura 4-23.

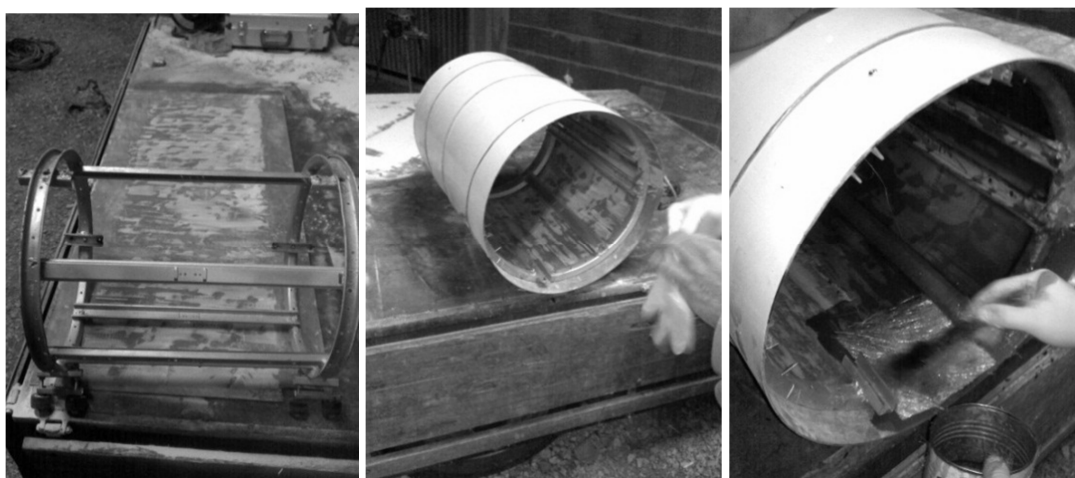


Figura 4-23: Etapas de Moldagem da fibra e fixação.

É de frisar que os tempos de secagem são deveras importantes, pois sendo uma solução pastosa é necessário um descanso de 12 a 24h, ou até de alguns dias, para estar com a totalidade da capacidade de aderência. Quando se força o processo de secagem da fibra, a mesma descola.

A etapa seguinte na construção do involuço do protótipo é o recorte e a aplicação dos topos, que são aplicados da mesma maneira, pelos orifícios das janelas que só podem ser criadas depois de toda a estrutura secar.

4.4.3 Corte e Moldagem de Vidro Acrílico

Nesta etapa de construção do protótipo não existe diferenciação entre a frente e a retaguarda, como tal, os dois visores previstos têm de ser orientados com a mesma dimensão e o mesmo formato.

A estrutura final do protótipo é utilizada como base de trabalho para a moldagem do vidro acrílico. Para moldar o acrílico, a sua temperatura tem de ser elevada, com o auxílio de sopradores elétricos também conhecidos por pistolas de ar quente, equipamentos que fornecem o ar quente com temperaturas a variar entre os 50° e 630°.

Quando o acrílico atinge o ponto de moldagem (passa do estado sólido a pastoso), inicia-se o processo de moldagem à forma pretendida, no presente caso a forma do protótipo.

O recorte final do vidro é executado com recurso a serras circulares, depois do vidro acrílico retornar ao estado sólido. O acrílico ainda sofre mais um processo de arredondamento de arestas, para aumentar a segurança e evitar lesões a utilizadores.

4.4.4 Apoio de Dobradiças Transparentes

As janelas, de forma geral, são apoiadas por meio de dobradiças, o caso presente não é exceção. Como se trata de um vidro acrílico, de um trabalho de um certo nível de exigência e de elevado valor estético, foi implementado uma dobradiça prolongada também em vidro acrílico.

Foram efetuados vários testes e tentativas (conforme na Figura 4-24 e Figura 4-25) de uso de equipamento mais vulgar, mas a resposta não foi satisfatória, por isso, desenvolveu-se uma versão personalizada.

Um vasto estudo e o melhoramento de algumas soluções deram origem aos prolongadores de dobradiças que se tornaram a versão final aplicada, demonstrada na Figura 4-26.



Figura 4-24: Vários moldes em papel / cartão.

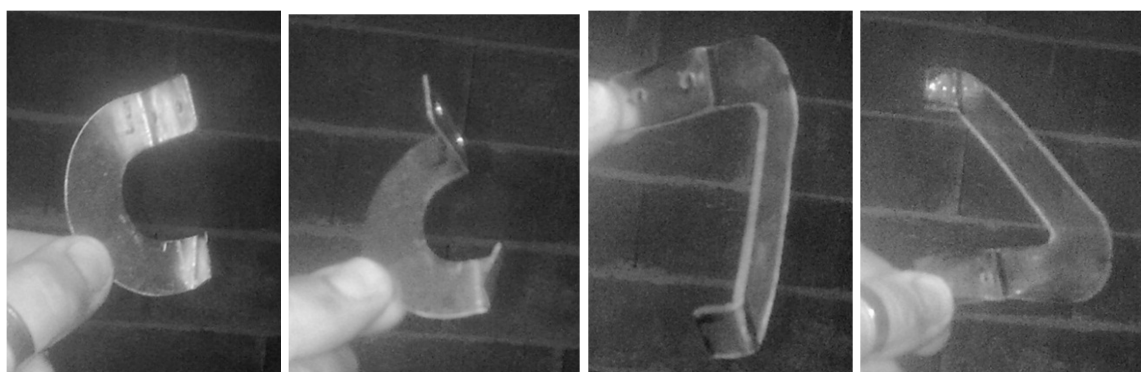


Figura 4-25: Moldes dos prolongadores em Aço e em Vidro Acrílico.



Figura 4-26: Aplicação da dobradiça com prolongadores.

4.4.5 Recorte para Janela

As janelas e vidros servem para visualizar eventuais obstáculos e permitir o controlo do veículo/protótipo por ação direta do utilizador, sob esta perspectiva, a instalação das janelas de visualização fazem todo o sentido.

O esboço do esquema das janelas foi melhorado e implementado. Sendo que o protótipo já com a fibra aplicada sofreu um processo de mudança de estilo. Atualmente é um protótipo com duas janelas, amplas e de grande abertura.

4.4.6 Pintura

Porque a estética tem a ver com as formas e a cor, o estudo da cor foi outro ponto importante a ser explorado, com base na Figura 4-27.



Figura 4-27: Protótipo para estudo de cor.

Por causa da existência das janelas, o interior do veículo também foi pintado, neste caso de preto fosco. Isso faz que o plano interior do veículo não se destaque. No interior do veículo será colocado o suporte de baterias, pintado da mesma cor do interior, para que este suporte não se destaque no veículo. Este estudo focou-se na necessidade de destacar o veículo como um todo e não uma pequena parte dele.

4.4.7 Estudo da Cor

Tomando a Figura 4-27 como uma base de trabalho, o estudo da cor pretendido foi desenvolvido através de método computacional (Photoshop), ao atribuir várias cores e tons ao veículo, de forma a dar uma melhor percepção do impacto visual do veículo (Figura 4-28).

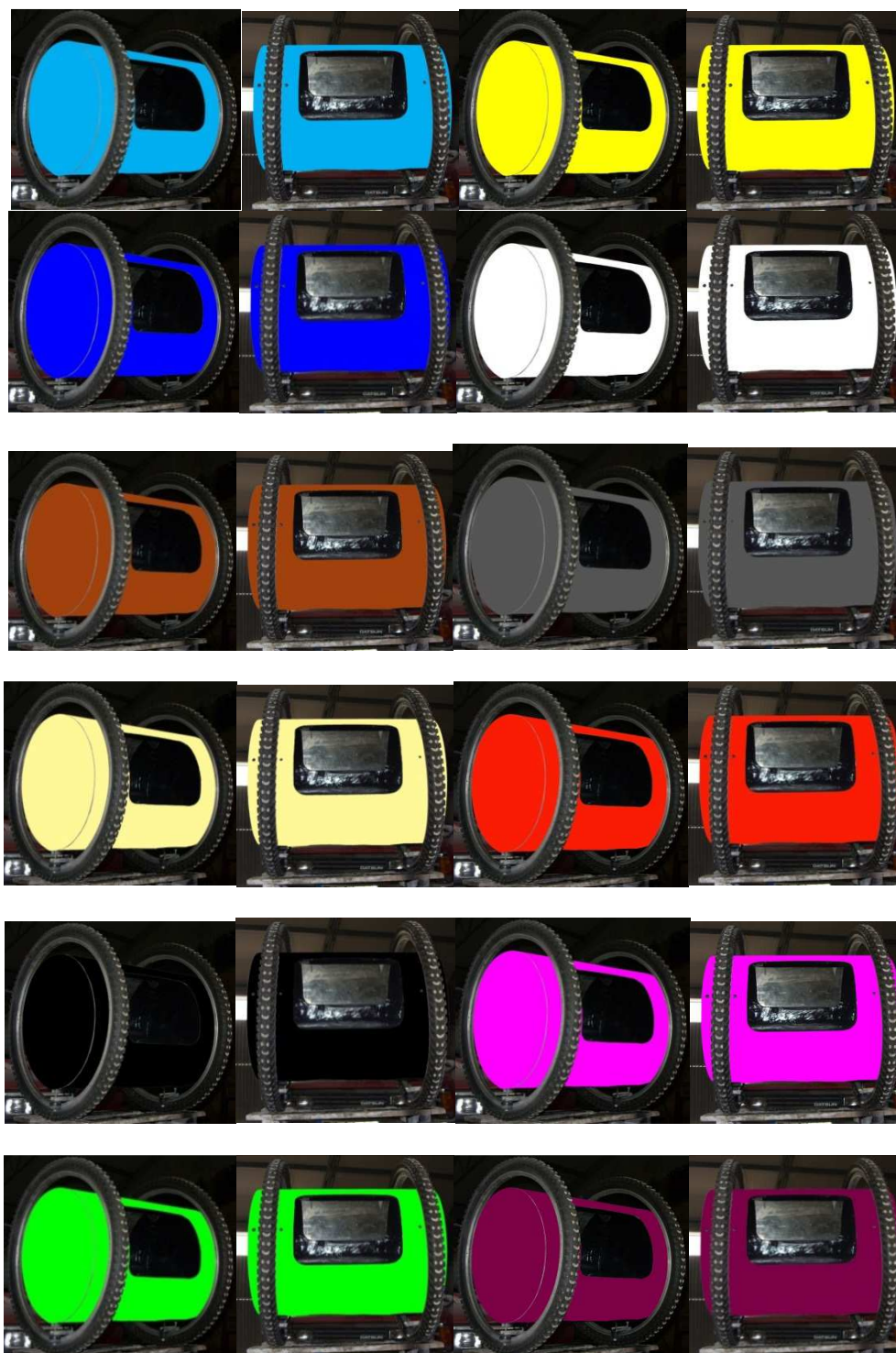


Figura 4-28: Protótipo com várias tonalidades para estudo da cor.

Mediante o estudo da cor, e tendo em conta ao impacto visual que é pretendido para o veículo, foi escolhido o tom de Amarelo (Amarelo Ferrari). Este tom incute ao veículo um aspeto amigável e agradável.

4.5 Montagem

Concluído a criação e transformação do projeto, é neste momento que se pode ver e analisar o aspeto geral do projeto. A junção das peças pintadas, com os pneus e vidros provocam um grande impacto visual, conforme mostrado na Figura 4-29.



Figura 4-29: Protótipo com pintura final.

Capítulo 5 Comando

Este capítulo tem como objetivo conceber todos os circuitos elétricos e eletrônicos, em malha aberta. É efetuada a análise do tipo de PWM e da proteção dos níveis de tensão para a segurança e longevidade das baterias. Pretende-se assim conceber o *driver* do conversor de corrente CC/CC e o interface homem/máquina.

O interface homem/máquina terá por base um comando por *joystick*. Este é adaptado de forma a obter um comando o mais intuitivo possível. De modo a obter os sinais corretos para o comando do conversor é necessária a utilização de um circuito eletrónico de interface.

5.1 Introdução

O sistema global de funcionamento do veículo é esquematizado em diagrama de blocos na Figura 5-1. Esta representação assenta nos diversos blocos constituintes de todo o sistema de potência e controlo, destacando-se as baterias, o condensador de filtragem, o conversor de potência, o motor, o modulador e a placa de interface.

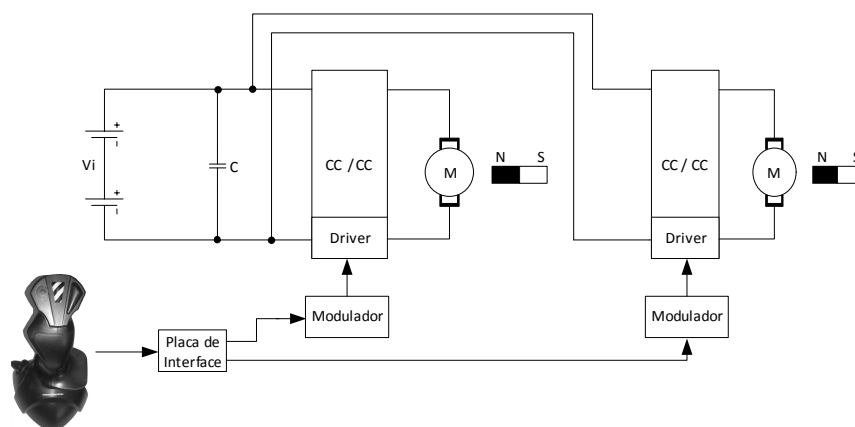


Figura 5-1: Esquema do acionamento elétrico de potência do veículo de teste [25].

O motor elétrico é de ímãs permanentes, de 24Vdc com 400W de potência. As baterias alimentam todo o sistema, estas são de 12Vdc cada uma, sendo utilizadas duas baterias em série. No sentido de permitir o comando de cada um dos motores é necessária a utilização de conversores de eletrónica de potência, que neste caso serão atuados por comando de PWM, gerado por uma placa designada de Modulador. O conversor eletrónico de potência

tem de ser cc/cc, pois a fonte de alimentação é de tensão contínua e os motores também o são.

Pretende-se que o veículo em causa apresente a capacidade de circulação em espaços apertados. Isso implica que cada um dos motores possa trabalhar nos quatro quadrantes de operação do ponto de vista mecânico (binário e velocidade). Neste sentido foi utilizado um conversor que permite operar nos quatro quadrantes da sua tensão e corrente de saída.

Para uma boa ergonomia optou-se por um *joystick*. Para que este sistema desenvolveu-se uma placa de interface. A mesma converte os sinais gerados pelo utilizador nos sinais de comando de cada um dos motores.

5.2 Modulador

O modulador permite gerar as formas de onda necessárias para comandar os estados do conversor de eletrônica de potência.

5.2.1 PWM a Dois Níveis

Genericamente, o PWM de dois níveis implica dois estados dos interruptores do conversor representado na Figura 5-6; S1 e S4 ligados (t_{on}) e S2 e S3 desligados (t_{off}) ou vice-versa.

A regulação da tensão de saída é efetuada por regulação dos intervalos de tempo em cada um dos estados. A este propósito é importante proceder à definição de fator de ciclo (*duty cycle*):

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} . \quad (5-1)$$

Deste modo, o valor médio da tensão de saída do conversor depende do fator de ciclo de acordo com a equação:

$$\bar{V}_0 = V_i (2D - 1) . \quad (5-2)$$

O valor médio da tensão pode deste modo ser, positivo, negativo ou igual a zero, de acordo com o fator de ciclo. No motor DC a tensão é aproximadamente proporcional à velocidade de rotação, conforme representado na Figura 5-2.

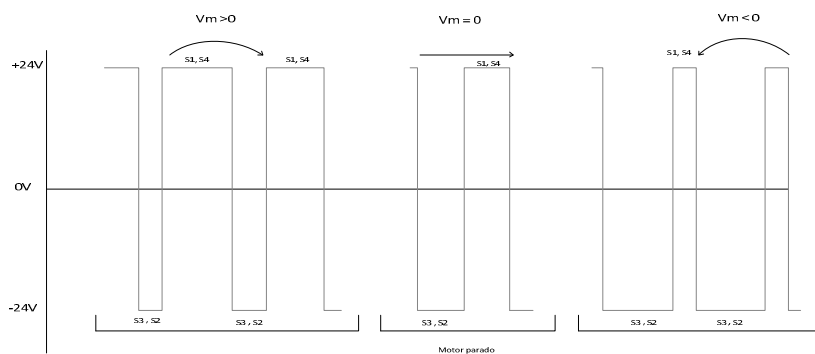


Figura 5-2: Gráfico estado do PWM 2 níveis sobre o sentido rotação.

A utilização de um PWM a dois níveis proporciona as seguintes características:

- Simplicidade na concretização do PWM.
- Elevado valor da potência de perdas de comutação, por operação dos quatro interruptores.
- A tensão de ondulação é elevada mesmo com uma tensão média de saída nula.

A produção do sinal PWM a dois níveis é realizada pela comparação de um valor de referência (variável perante a necessidade) com uma onda de formato triangular (Figura 5-3).

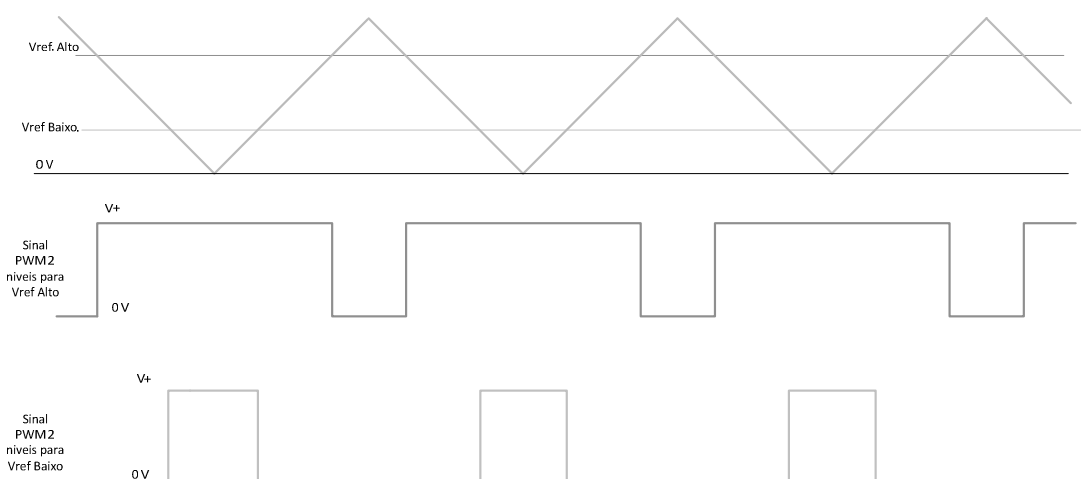


Figura 5-3: Criação de PWM a dois níveis.

Conforme a tensão de referência varia, o fator de ciclo do PWM correspondente também variará.

5.2.2 PWM a Três Níveis

Na geração do PWM a dois níveis, o estado dos interruptores S1 e S4, assim como de S2 e S3 é igual. No entanto neste circuito existe um grau de liberdade proporcionado pelo facto de se poder operar cada interruptor de modo individual.

A Figura 5-4 define o sinal PWM a três níveis, em função da tensão média que se pretende obter (relacionado com o movimento pretendido).

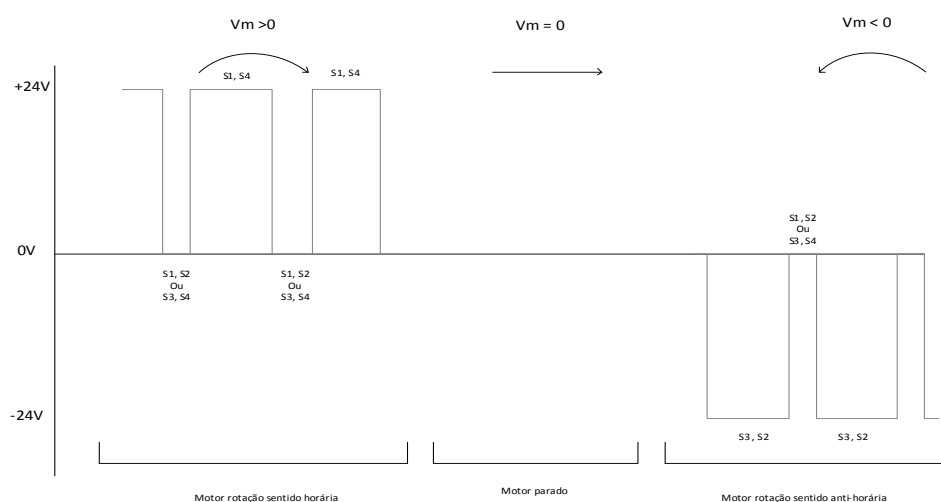


Figura 5-4: Gráfico estado do PWM dois níveis sobre o sentido rotação.

A geração de um sinal PWM a três níveis é mais complexa do que o PWM a dois níveis. Este tipo de PWM apresenta, no entanto, varias vantagens:

- Menores perdas no conversor (por redução da corrente de ondulação).
- As componentes de alta frequência da tensão e da corrente no motor serão mais reduzidas.

No caso de um PWM a dois níveis, do ponto de vista do motor, quando este se encontra parado ($D=50\%$), a tensão aos seus terminais é uma onda quadrada com a amplitude da tensão de alimentação. No caso de uso de um PWM a três níveis, o valor da tensão presente no motor será nulo nesta situação.

Um método de obter um PWM a três níveis corresponde a efetuar uma comparação do sinal de referência e do seu simétrico com uma onda triangular, tal como o representado na

Figura 5-5. Nesta figura encontra-se ainda representados os sinais de saída de cada um dos comparadores que irão atuar cada uma das meias pontes constituintes.

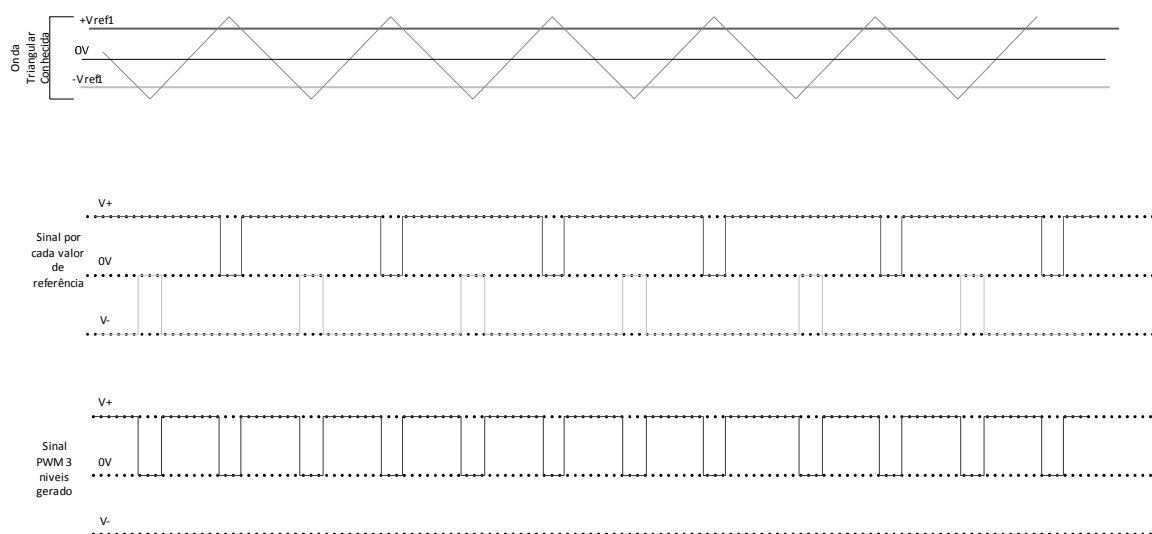


Figura 5-5: Figura do comportamento de referência para PWM a 3 níveis.

Tal como o representado na *Figura 5-5*, verifica-se que a frequência da onda de saída, f' , é o dobro da frequência da onda triangular utilizada para efetuar a modulação.

$$f' = 2 \times f \quad (5-3)$$

No veículo será usado o comando com PWM a três níveis.

5.3 Conversor cc/cc

O conversor eletrónico de potência utilizado é um conversor de contínuo para contínuo (cc/cc ou *chopper* na sua designação em inglês). Este conversor tem em conta a reversibilidade em corrente, para permitir que a corrente flua das baterias para a carga assim como da carga para as baterias durante a “travagem”. A topologia que reúne simultaneamente estas características e permite ainda a reversibilidade do movimento (operação em quatro quadrantes), é a montagem em ponte.

A Figura 5-6 representa o esquema do conversor eletrónico de potência cc/cc de quatro quadrantes utilizado e a respectiva carga (motor eléctrico) [25].

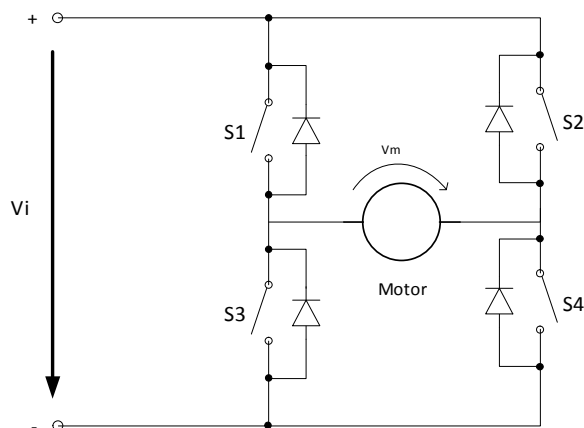


Figura 5-6: Esquema de ponte completa (Full-Bridge).

Na Figura 5-6 visualizam-se os quatro interruptores, bem como os díodos em antiparalelo em cada interruptor. Estes díodos são designados por díodos de roda livre e têm a função de assegurar a continuidade da corrente elétrica quando o referido interruptor eletrônico passa do estado de condução ao estado de corte.

O comando do conversor eletrônico de potência é realizado através de uma modulação de largura de pulso, MLI (do inglês PWM- *Pulse With Modulation*). Esta modulação poderá ser efetuada em PWM a dois níveis ou três níveis, como será descrito posteriormente.

De modo a que o seu funcionamento não interfira com a banda audível utiliza-se uma frequência de comutação de 20 Khz.

5.3.1 Seleção dos Semicondutores de Potência

As características dos interruptores são dependentes do conhecimento das especificações técnicas do motor e das baterias.

De acordo com os dados anteriormente fornecidos para as características do motor e das baterias em causa, pode-se calcular a corrente máxima:

$$P_{motor} = V_s \times I_s , \quad (5-4)$$

$$I_s = \frac{P_{motor}}{V_s} = \frac{400}{24} \cong 16,7 \text{ A} . \quad (5-5)$$

Pretende-se o funcionamento em regime de comutação a uma frequência superior à banda de áudio, para permitir uma diminuição do tremor da corrente e afastar o ruído associado à comutação da banda audível. As soluções mais usuais serão, deste modo: transístores IGBT ou MOSFET.

Os transístores MOSFET são mais vantajosos quanto à rapidez de comutação e às perdas de comutação em dispositivos de baixa tensão [26].

São utilizados transístores MOSFET. No estado de condução este transistor comporta-se como sendo uma resistência, de valor R_{DSon} .

Optou-se pela referência IRFB 3607. Este semiconductor apresenta as seguintes características principais:

- $V_{DSS}=75V$ – Valor máximo da tensão aos terminais *Dreno-Source*.
- $I_{D25}=80A$ – Valor máximo da corrente, contínua, para uma temperatura da junção de $25^{\circ}C$.
- $R_{DSon}=9m\Omega$, para $I_D=46A$ com $T_c=125^{\circ}C$.
- Tempos de passagem ao corte e à condução inferiores a $46ns$ ($I_D=46A$).

5.3.2 Dimensionamento do Dissipador de Calor

A resistência térmica do dissipador é determinada com base na equação (5-6), que define a temperatura dos semicondutores num determinado caso.

$$T_j = T_a + P_d (R_{thj-c} + R_{thc-s} + R_{ths-a}) \quad (5-6)$$

Nesta expressão T_j representa a temperatura de junção do semiconductor ($T_j = 125^{\circ}C$ na situação em análise), T_a a temperatura ambiente máxima do meio onde o dispositivo vai funcionar, P_d a potência dissipada na junção semicondutora, R_{thj-c} a resistência térmica entre o semiconductor e a cápsula, R_{thc-s} a resistência térmica entre a cápsula e o dissipador e R_{ths-a} a resistência térmica entre o dissipador e o meio ambiente.

Considera-se um valor de 30°C para a temperatura ambiente máxima onde os semicondutores vão operar. Com base no catálogo do fabricante, o valor das resistências térmicas são: $R_{th_{s-a}} = 1,045^\circ\text{C}/\text{w}$ e $R_{th_{c-s}} = 0,05^\circ\text{C}/\text{w}$.

A potência dissipada pelo semicondutor (P_d) engloba as potências de perdas na condução (P_c) e na comutação (P_s) sendo dada pela expressão (5-7).

$$P_d = P_c + P_s \quad (5-7)$$

5.3.2.1 Cálculo da Potência de Perdas de Condução

A potência de perdas de condução na zona ôhmica é dada pela expressão (5-8) onde $R_{DS_{on}/T=125^\circ\text{C}}$ é o valor de resistência aos terminais *dreno - source* considerado à temperatura de funcionamento de 125 °C e $I_{D_{RMS}}$ é o valor eficaz de corrente de *dreno*.

$$P_c = R_{DS_{on}/T=125^\circ\text{C}} \times I_{D_{RMS}}^2 \quad (5-8)$$

O valor eficaz da corrente de dreno é de 16,7 A, optou-se por utilizar um único dissipador para os dois conversores de potência; oito transístores no dissipador. O valor da resistência $R_{DS_{on}}$ dado pelo fabricante é para uma temperatura de 25°C de $R_{DS_{on}/T=25^\circ\text{C}} = 7,24\text{m}\Omega$, sendo então necessário extrapolar o valor para a temperatura T_j , através da expressão (5-9).

$$R_{DS_{on}/T=125^\circ\text{C}} = R_{DS_{on}/T=25^\circ\text{C}} + \zeta(T_j|T=125^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \quad (5-9)$$

Sendo ζ o coeficiente de temperatura. Este pode ser calculado por linearização da característica da Figura 5-7, que representa o valor de $R_{DS_{on}}$ em função da temperatura do semicondutor T_j (°C). Considerando o coeficiente de temperatura ζ , como o diferencial da aproximação linear entre os valores de $R_{DS_{on}/T=0^\circ\text{C}}$ e de $R_{DS_{on}/T=150^\circ\text{C}}$ é obtida a expressão (5-10).

$$\zeta = \frac{R_{DS_{on}/T=150^\circ\text{C}} - R_{DS_{on}/T=0^\circ\text{C}}}{150} \quad (5-10)$$

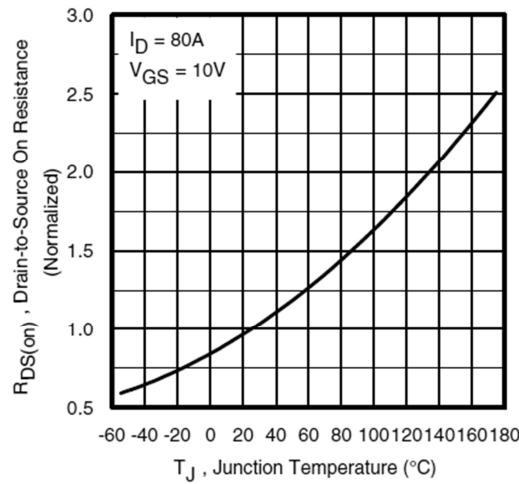


Figura 5-7: Variação do R_{DSon} em função da temperatura do semiconductor [27] .

Através da leitura de valores da Figura 5-7 pode obter-se:

$$R_{DSon|T=150^{\circ}\text{C}} \approx 2,15 \times R_{DSon|T=25^{\circ}\text{C}} \rightarrow R_{DSon|T=150^{\circ}\text{C}} \approx 2 \times 7,24 \times 10^{-3} = 0,01448\Omega , \quad (5-11)$$

$$R_{DSon|T=0^{\circ}\text{C}} \approx 0,7 \times R_{DSon|T=25^{\circ}\text{C}} \rightarrow R_{DSon|T=0^{\circ}\text{C}} \approx 0,8 \times 7,24 \times 10^{-3} = 0,0058\Omega , \quad (5-12)$$

$$\varsigma = \frac{0,01448 - 0,0058}{150} = 58 \times 10^{-6} \Omega/^{\circ}\text{C} . \quad (5-13)$$

Considerando que a temperatura T_j limite de funcionamento é de 125°C então substituindo os valores anteriores na expressão (5-9) obtém-se o valor de $R_{DSon|T=125^{\circ}\text{C}}$.

$$R_{DSon|T=125^{\circ}\text{C}} = 7,24 \times 10^{-3} + 58 \times 10^{-6}(125 - 25) = 0,013\Omega \quad (5-14)$$

Sabendo o valor $R_{DSon|T=125^{\circ}\text{C}}$ e o valor da corrente $I_{D_{RMS}}$ é calculado o valor da potência de perdas na condução na totalidade das duas meias-pontes:

$$P_c = 4 \times (0,013 \times 16,7^2) = 14,50W . \quad (5-15)$$

5.3.2.2 Cálculo da Potência de Perdas de Comutação

A potência de perdas na comutação do semiconductor (P_s) resulta da existência simultânea da tensão e da corrente durante as mudanças de estado (corte - condução e condução -

corte). Para circuitos com uma carga indutiva pode calcular-se a potência dissipada na comutação através da expressão (5-16), em que $t_{(off-on)}$ é o tempo de transição de corte à condução, $t_{(on-off)}$ é o tempo de transição entre a condução e corte, V_s e I_s são respectivamente a tensão e a corrente e f_c é a frequência de comutação.

$$P_s = \frac{t_{(off-on)} + t_{(on-off)}}{2} \times V_s \times I_s \times f_c . \quad (5-16)$$

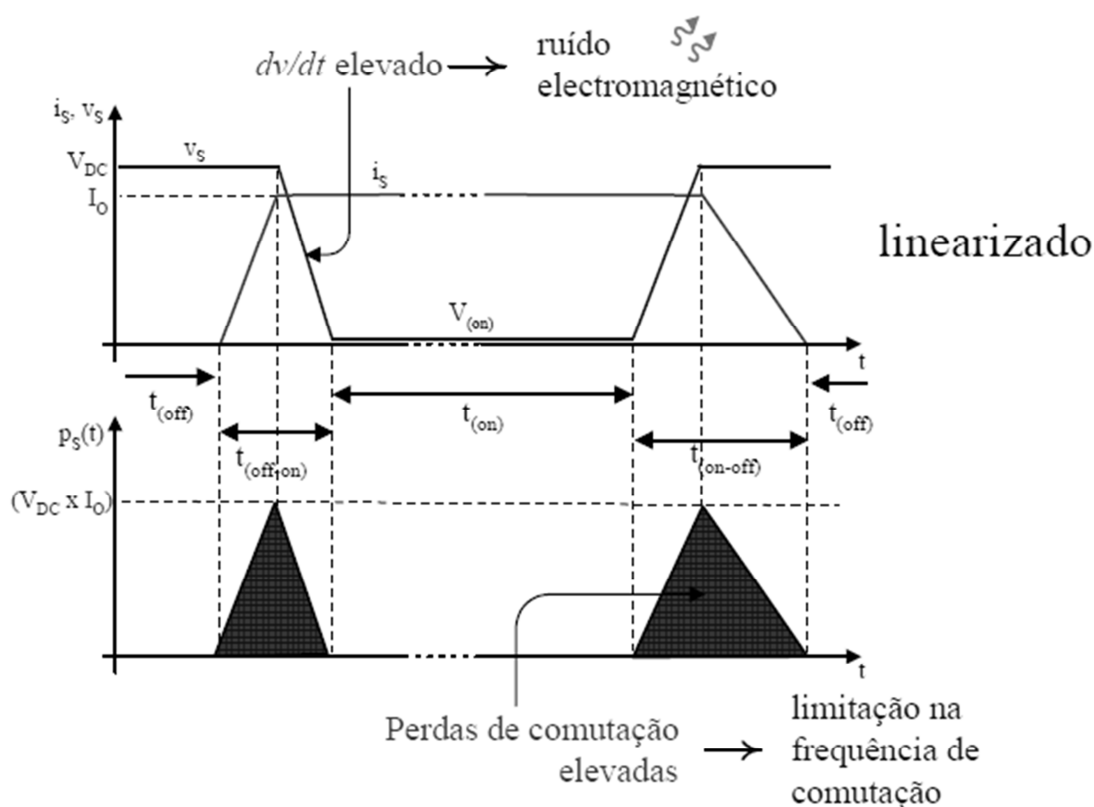


Figura 5-8: Tensão e corrente num MOSFET durante as comutações [28].

Considerando valores para o tempo de subida da corrente t_r de 16 ns , do tempo de descida t_f de 43 ns , V_s de 24 V e I_s de $16,7 \text{ A}$, é ainda necessária obtenção da frequência de comutação dos interruptores, f_c , para que se possa calcular as perdas de comutação.

A frequência f_c determina-se com base na equação (5-3) em PWM a três níveis. Sabendo que a frequência do sistema é de:

$$f = 20 \text{ KHz} . \quad (5-17)$$

Partindo da expressão (5-16) são calculadas as perdas de comutação P_s .

$$P_s = 2 \times \left(\frac{t_{(off-on)} + t_{(on-off)}}{2} \times V_s \times I_s \times f_c \right) =$$

$$= 2 \times \left(\frac{59 \times 10^{-9} + 59 \times 10^{-9}}{2} \times 24 \times 16,7 \times 20 \times 10^3 \right) \quad (5-18)$$

$$P_s \cong 0,946 \text{ W}. \quad (5-19)$$

Somando o valor da potência de perdas de condução P_c com o valor da potência de perdas de comutação P_s obtém-se o valor da potência dissipada P_d .

$$P_d = 14,50 + 0,946 = 15,446 \text{ W} \quad (5-20)$$

Partindo da expressão (5-6) obtém-se para a totalidade do circuito:

$$(125) = (30) + 15,446(1,045 + 0,05 + R_{th_{s-a}}) \leftrightarrow R_{th_{s-a}} = 5,055 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (5-21)$$

No circuito, como anteriormente referido, consta oito transístores em paralelo, o que a dissipação pela resistência térmica em cada transístor seja uma parte do total:

$$R_{th_{s-a}} = \frac{5,055}{8} = 0,632 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (5-22)$$

5.4 Placa de Interface

Com o intuito de obter uma grande mobilidade, acessibilidade e adaptabilidade, foram testados dois interfaces.

5.4.1 Objetivos do Comando

Pretende-se que o interface seja intuitivo no sentido de obter liberdade de movimentos, rapidez e versatilidade. Perante a dificuldade de conjugar estes três objetivos tem que se obter um compromisso.

Qualquer movimento de um veículo pode ser visto como o conjugar de dois aspetos fundamentais: o raio de viragem e a velocidade do veículo.

5.4.2 Sistemas Desenvolvidos

Para efetuar testes, a maneira mais simples de comandar o veículo corresponde a uma geração independente das velocidades de referência de cada um dos motores.

O comando é composto por dois potenciômetros (um para cada um dos motores) e um botão de pressão normalmente aberto.

Através da actuação dos potenciômetros obtém-se à sua saída uma tensão com excursão positiva e negativa. O ponto intermédio corresponde a uma tensão nula, ou seja, a não haver velocidade no motor correspondente.

O botão de pressão permite, quando pressionado, o funcionamento do sistema.



Figura 5-9: Imagem de comando plano.

Este modelo de comando, representado na Figura 5-9, apresenta as seguintes características:

- Elevado grau de dificuldade na adaptabilidade , do ponto de vista do utilizador (deficiente ergonomia).
- Sistema de paragem de emergência integrado.
- Resposta rápida de acção/reacção.

Este sistema apresenta elevada simplicidade mas fraca ergonomia. Deste modo sentiu-se a necessidade de desenvolver um comando com melhores características que resolvesse os pontos negativos já mencionados.

No sentido de fazer coincidir as trajetórias pretendidas (ao nível de velocidade e direção), com uma percepção humana dessas grandezas, recorreu-se a um comando já usual em aplicações de lazer no domínio informático (*joystick*).

Os sinais de saída do Joystick traduzem um movimento num sistema de eixos cartesiano, com recurso a dois potenciômetros. A parte superior do manípulo possui um botão de pressão frontal, utilizado para a ativação de marcha (*enable*).

A adaptação deste comando ao sistema, necessita de uma placa de interface que converte os sinais dos potenciômetros nos sinais de comando dos dois motores.



Figura 5-10: Imagem de comando usual, efeito combinado nos eixos XY.

O modelo testado (Figura 5-10), apresenta as seguintes características:

- Facilidade na adaptabilidade.
- Boa ergonomia.
- Assegura um sistema de paragem de emergência.
- Necessidade de comando por uma única mão.
- Por defeito a velocidade é zero (retorno ao ponto central do comando).

Com base nas vantagens referidas, este foi o sistema utilizado. De seguida procede-se ao estudo da adaptação do comando da *Figura 5-10* através do desenvolvimento de uma placa de interface.

5.4.3 Desenvolvimento do Interface Homem/Máquina

O meio de interação do *joystick* com as necessidades de movimentação do veículo é um aspeto complexo que entra no domínio da ergonomia. Após várias reflexões sobre o método mais intuitivo e que simultaneamente utiliza as possibilidades proporcionadas por uma estrutura holonómica, chegou-se à solução a seguir apresentada.

Intuitivamente ao acionar o *joystick*, no eixo vertical (*Figura 5-11*), espera-se que o movimento corresponda a um avanço ou um retrocesso, com uma velocidade proporcional ao deslocamento do manípulo. No eixo horizontal pretende-se que o veículo curve.

O veículo, conforme já mencionado, é holonómico o que permite que o limite máximo de curvatura corresponde a ele rodar sobre si mesmo. No sentido de explorar esta possibilidade optou-se por esta situação acontecer nos dois extremos da reta horizontal da atuação do *joystick*. Para a esquerda ele rodará no sentido anti-horário e para a direita, o seu inverso.

Em termos de atuação dos dois motores isso corresponde a uma atuação com valores simétricos entre si (velocidades simétricas para cada roda, de acordo com a *Figura 5-11*).

O eixo vertical corresponde ao valor da velocidade pretendida para o veículo e o eixo horizontal à curvatura da trajetória.

Existem várias combinações possíveis. As situações correspondentes aos pontos extremos foram já referidas. Os pontos intermédios admitem valores possíveis entre os extremos de posição.

Nos pontos extremos a velocidade de cada roda possui um módulo de igual valor entre si (ter o mesmo sentido ou sentido inverso). Nos pontos intermédios o mesmo não se verifica, o que corresponde a uma trajetória curvilínea com um raio correspondente à posição do *joystick*.

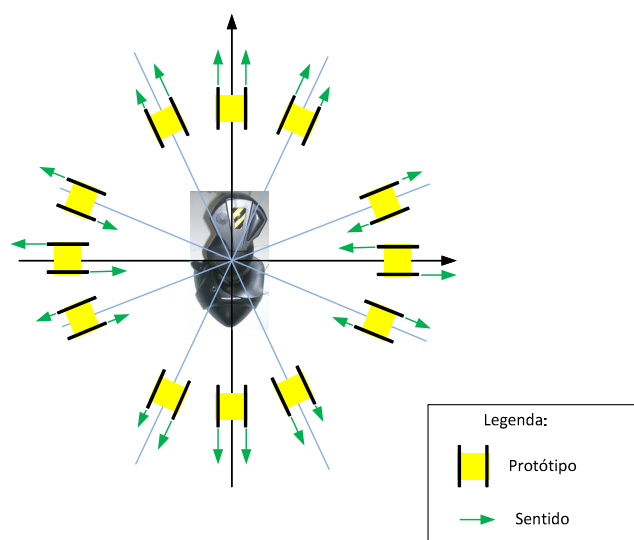


Figura 5-11: Sentidos do comando para forças percentuais nas rodas.

O comando é constituído por dois potenciômetros, em que cada um define os valores num único eixo, um para o eixo XX (horizontal) e outro para o eixo YY (vertical). Por questões de simplicidade, considera-se as excursões máximas unitárias em cada um dos eixos ($X_{\text{máx}}=1$ e $Y_{\text{máx}}=1$).

O potenciômetro apresenta uma resistência variável, sendo que metade da resistência corresponde ao ponto nulo do respetivo eixo.

A velocidade de cada uma das rodas depende das componentes em XX e YY do ponto de atuação do *joystick*.

Foram utilizados potenciômetros de 100K Ω . Os extremos dos potenciômetros foram alimentados com uma tensão (V) de 0 e 5 volts, respetivamente.

A Tabela 5-1 esquematiza a tensão de saída do comando (correspondente a cada um dos potenciômetros), para várias situações.

Tensões de saída do comando	
5 Vdc	Máximo positiva
2,5 Vdc	Ponto neutro
0 Vdc	Máximo negativo

Tabela 5-1 – Tensão de saída dos potenciômetros em função da posição no eixo.

A título de exemplo, no sentido de clarificar as tensões existentes em algumas situações concretas, identificam-se alguns pontos: A ; B ; C ; D e E na Figura 5-12.

Estes pontos correspondem aos movimentos nas posições limites do *joystick* e que também assumem referências bem definidas nos critérios de velocidade dos motores.

Pretende-se que as posições intermédias entre estes pontos assumam valores intermédios dos seus extremos (resposta linear).

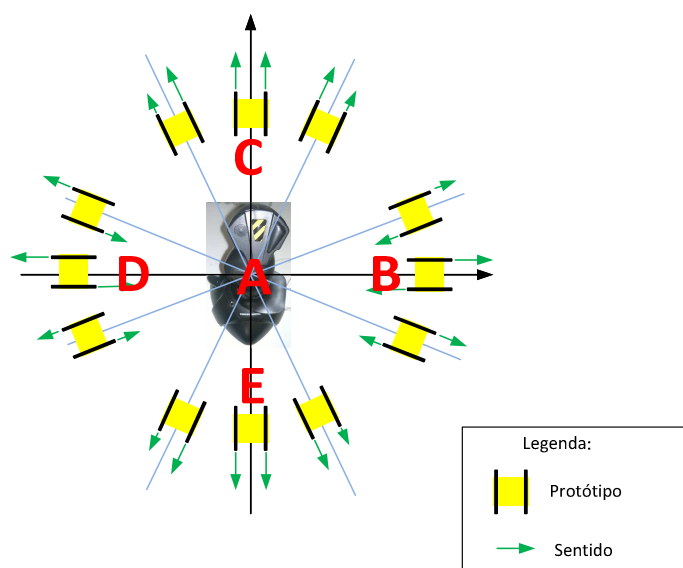


Figura 5-12: Pontos de referência do comando / sentido dos motores.

De acordo com o esquema de funcionamento da *Figura 5-12* e concomitantemente com os dados da Tabela 5-1, obtém-se assim o referido critério de funcionamento, conforme explicito na Tabela 5-2. Foi considerado que os valores de tensão que irão atuar os moduladores estarão compreendidos entre zero e cinco volt.

Posição	Valor do Eixo		Estado pretendido		Tensão de entrada do Modulador	
	X	Y	Motor. Esq.	Motor. Dir.	Motor. Esq.	Motor. Dir.
A	0	0	Parado	Parado	2,5	2,5
B	1	0	Frente: $V_{\text{máx}}$	Trás: $-V_{\text{máx}}$	5	0
C	0	1	Frente: $V_{\text{máx}}$	Frente: $V_{\text{máx}}$	5	5
D	-1	0	Trás: $-V_{\text{máx}}$	Frente: $V_{\text{máx}}$	0	5
E	0	-1	Trás: $-V_{\text{máx}}$	Trás: $-V_{\text{máx}}$	0	0

Tabela 5-2 – Tabela de conversão entre a posição do joystick sobre os eixos e a tensão de saída.

A Tabela 5-2 representa o modelo matemático da relação entrada/saída da placa do interface a desenvolver.

De modo a simplificar a análise esta é efetuada em separado para cada um dos motores, tal como representado na Tabela 5-3 (motor esquerdo) e na Tabela 5-4 (motor direito).

Mais uma vez por questões de simplicidade, considera-se que o deslocamento à velocidade máxima de cada um dos motores será definido como (Frente: $V_{\text{máx}} = 1$), a velocidade máxima para trás é (Trás: $-V_{\text{máx}} = -1$) e parado é (Parado = 0).

Posição	Valor do Eixo		Motor Esq.
	X	Y	
A	0	0	Parado
B	1	0	Frente: $V_{\text{máx}}$
C	0	1	Frente: $V_{\text{máx}}$
D	-1	0	Trás: $-V_{\text{máx}}$
E	0	-1	Trás: $-V_{\text{máx}}$

Tabela 5-3 – Tabela estados do motor lado “esquerdo”.

Compilando a tabela numa forma matricial, para os vários casos em causa e considerando as coordenadas X e Y como um par ordenado pretende-se que cada par corresponda a uma posição de saída (termo independente das equações matriciais) para o modulador.

Da análise da tabela, verifica-se para o motor esquerdo que:

$$\begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} \left\{ \begin{array}{l} 0X + 0Y = 0 \\ 1X + 0Y = 1 \\ 0X + 1Y = 1 \\ -1X + 0Y = -1 \\ 0X - 1Y = -1 \end{array} \right\} . \quad (5-23)$$

Como síntese do resultado matricial obtido, conclui-se que nos cinco pontos de análise, a operação soma entre os valores das duas coordenadas do par ordenado, realiza o valor da tensão pretendida para o comando do modulador deste motor (V_{Mesq}).

Esta função corresponde aos critérios pretendidos nos pontos considerados. Nas posições intermédias a variação será progressiva.

$$V_{\text{Mesq}} = X + Y \quad (5-24)$$

Admitindo as mesmas considerações utilizadas na construção da Tabela 5-3, a análise das saídas para os diversos pontos, referente ao motor lado direito ($V_{M_{dir}}$), encontra-se representada na Tabela 5-4.

Posição	Valor do Eixo		Motor Dir.
	X	Y	
A	0	0	Parado
B	1	0	Trás: $-V_{máx}$
C	0	1	Frente: $V_{máx}$
D	-1	0	Frente: $V_{máx}$
E	0	-1	Trás: $-V_{máx}$

Tabela 5-4 – Tabela de estados do motor lado “direito”.

Compilando agora esta tabela numa forma matricial, para os vários casos em causa, como já efetuado para o outro motor, pretende-se que a cada par ordenado corresponda a uma tensão de saída para o modulador.

Da análise da tabela, numa primeira aproximação, verifica-se para o motor direito que, os valores obtidos com base no par ordenado, não correspondem às necessidades de saída.

$$\begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} \left\{ \begin{array}{l} 0X + 0Y = 0 \\ 1X + 0Y = -1 \\ 0X + 1Y = 1 \\ -1X + 0Y = 1 \\ 0X - 1Y = -1 \end{array} \right. . \quad (5-25)$$

Assim, por análise a equação matricial verifica-se que ao utilizar os valores simétricos de XX, a correspondência estará de acordo com o pretendido:

$$\begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} \left\{ \begin{array}{l} 0X + 0Y = 0 \\ -1X + 0Y = -1 \\ 0X + 1Y = 1 \\ 1X + 0Y = 1 \\ 0X - 1Y = -1 \end{array} \right. . \quad (5-26)$$

Com esta transformação de valores das coordenadas em XX, o sistema matricial nos pontos definidos, exprime o pretendido para o modulador.

Conclui-se assim que a função que rege este motor é:

$$V_{Mdir} = -X + Y . \quad (5-27)$$

Até aqui foi considerado, de modo simplificado, que a tensão de entrada no modular estava compreendida no intervalo $[-1; 1]$. Tal como será referido posteriormente, no item correspondente ao modulador, a tensão de entrada deverá estar compreendida entre $[0; 5]$.

A solução mais óbvia seria utilizar uma tensão simples para alimentar os potenciômetros (0 e 5 V) conforme representado na Figura 5-13.

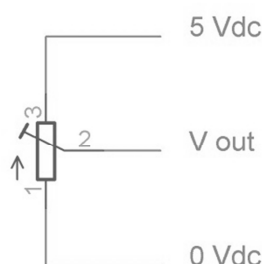


Figura 5-13: Esquema de ligação de resistência variável de 0 a 5 Vdc.

Com este esquema de alimentação, os dados obtidos estão expressos na Tabela 5-5.

Posição	Vdc Out Comando		Vdc Entrada PWM	
	X	Y	X + Y	-X + Y
A	2,5	2,5	5	0
B	5	2,5	7,5	-2,5
C	2,5	5	7,5	2,5
D	0	2,5	2,5	2,5
E	2,5	0	2,5	-2,5

Tabela 5-5 – Tabela de relação entrada-saída com alimentação de 0 e 5Vdc.

Analisando a Tabela 5-5 verifica-se que as saídas não estão compreendidas nos intervalos de tensões admissíveis para a entrada do modulador.

Se forem utilizadas tensões simétricas para a alimentação dos potenciômetros (Figura 5-14), este problema será resolvido, tal como representado na Tabela 5-6.

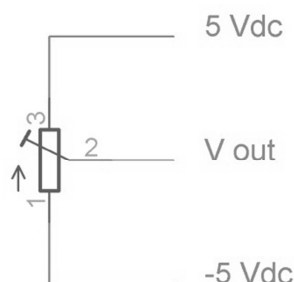


Figura 5-14: Esquema de ligação de resistência variável de -5 a 5 Vdc.

Posição	Vdc Out Comando		Vdc Entrada PWM	
	X	Y	X + Y	-X + Y
A	0	0	0	0
B	5	0	5	-5
C	0	5	5	5
D	-5	0	-5	5
E	0	-5	-5	-5

Tabela 5-6 – Tabela de relação entrada-saída com alimentação de -5 e 5Vdc.

Neste caso existe a necessidade de geração de uma tensão de alimentação simétrica (-5 e +5 V).

Existem várias formas de o fazer. De modo a obter um elevado rendimento, a solução passa sempre pela utilização de conversores de eletrónica de potência. A elaboração deste tipo de circuitos revela-se complexa e fora do contexto de desenvolvimento do veículo. Neste sentido procuraram-se soluções existentes noutras áreas. No domínio dos interfaces de comunicação em sistemas informáticos existem já soluções implementadas num único circuito integrado, tal como será referido no ponto 5.6.4.

5.5 Circuitos auxiliares

Existem diversas funções que não correspondem diretamente a necessidades do veículo mas que decorrem das necessidades dos circuitos existentes. Estes serão abordados de seguida.

5.5.1 Geração do Valor Simétrico da Referência

Tal como posteriormente será referido, o modulador será baseado no circuito SG3524. Este é alimentado com tensão simples. A geração do PWM é efetuada por comparação de V_{ref} e $-V_{ref}$ com uma onda triangular (Figura 5-5). Neste caso concreto, essa onda triangular é gerada pelo próprio integrado, estando compreendida entre zero e cinco volt. São necessários dois SG3524, um para atuar cada uma das meias-pontes que em conjunto formam o conversor em ponte completa.

Devido á utilização de uma tensão simples, os valores da entrada dos comparadores não deverão ser o simétrico um do outro, mas serão iguais aos anteriores (V_{ref} ; $-V_{ref}$) mas incrementados de 2,5V ($V_{ref}+2,5$; $-V_{ref}+2,5$), tal como representado na Figura 5-15.

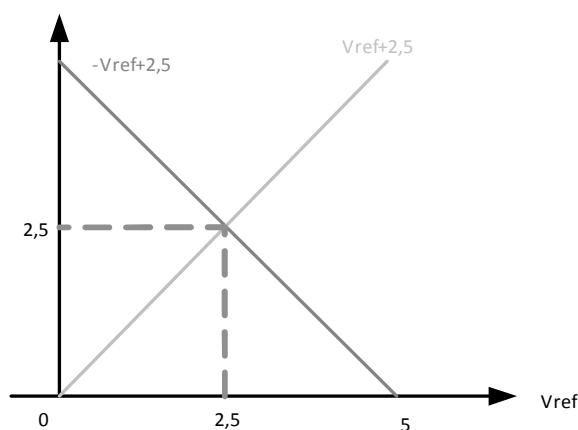


Figura 5-15: Correlação entre tensão para PWM (V_{ref}) e tensão para cada regulador.

A placa de interface gera o sinal $V_{ref} + 2,5$, para gerar $-V_{ref} + 2,5$ é necessário projetar um circuito.

Na prática, a onda triangular gerada varia entre [0,7; 3.8], de modo que o centro das referências deverá ter um valor:

$$V_{méd} = \frac{V1_{min} + V1_{máx}}{2} = 2.25V. \quad (5-28)$$

De modo a possibilitar a geração da tensão -Verf +2,25 V, utiliza-se um ampop em montagem diferença, tal como na Figura 5-16.

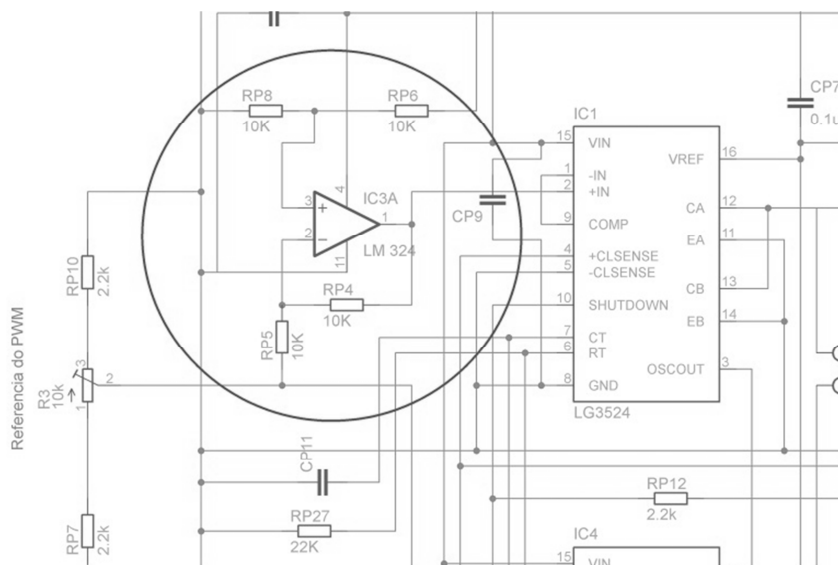


Figura 5-16: Utilização de montagem diferença com AmpOp

Deste modo, também as referências fornecidas pelo comando têm de ser ajustadas de acordo com a nova onda triangular.

5.5.2 Proteção de Subtensão

Pretende-se desenvolver uma proteção que por um lado garanta os níveis tensão considerados mínimos para o correto funcionamento do circuito e por outro evite uma descarga profunda das baterias, com a consequente sulfatação destas, conforme mencionado anteriormente.

Considera-se uma tensão mínima admissível (V_{sub}) de 24V, este valor assegura que a bateria tem elevada longevidade (a descarga não é completa, Tabela 5-7).

Estado da carga	Tensão da bateria			Estado da bateria
[%]	Tensão / Célula	1 elemento 12V	2 elementos 24V	Zonas de funcionamento
100%	2,18	13,1	26,2	Excelente
90%	2,14	12,8	25,6	
80%	2,11	12,7	25,4	
70%	2,08	12,5	25	Regular
60%	2,05	12,3	24,6	
50%	2,03	12,2	24,4	Regular
40%	2,01	12,1	24,2	
30%	1,99	11,9	23,8	Frac
20%	1,97	11,8	23,6	
10%	1,95	11,7	23,4	Zona de funcionamento não admissível
0	1,93	11,6	23,2	

Tabela 5-7 – Tabela de relação da carga da bateria com a tensão.

O método de proteção é efetuado por comparação do valor de tensão existente nas baterias com um valor de referência, considerado neste caso como sendo 3V.

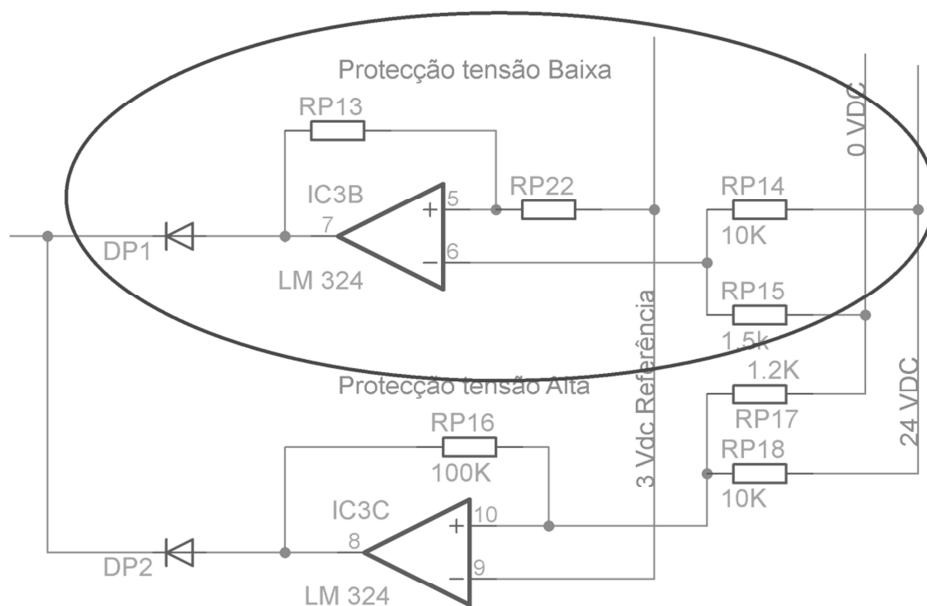


Figura 5-17: Divisor de tensão para proteção de subtensão.

Existe um divisor de tensão composto por RP14 e RP15 (Figura 5-17) que diminui a tensão da bateria para valores considerados aceitáveis para o AmpOp. O valor de RP15 será calculado com base no de RP14. Um valor genérico para atribuir a RP14 é $10K\Omega$, assim:

$$V_{ref} = \frac{RP15}{RP14 + RP15} V_{sub} . \quad (5-29)$$

Resolvendo a equação anterior em relação a RP15:

$$RP15 = \frac{V_{ref} \times RP14}{V_{sub} - V_{ref}} . \quad (5-30)$$

Considerando que os valores para V_{ref} e V_{sub} de 3V e 24V, respetivamente, obtém-se o valor de RP15:

$$RP15 = \frac{30K}{21} \cong 1,5K\Omega . \quad (5-31)$$

5.5.3 Proteção de Sobretensão

Como o conversor permite “travagem” regenerativa dos motores pode eventualmente ocorrer uma sobretensão. Em condições normais, as baterias têm capacidade de absorver a corrente sem que as tensões se elevem demasiado. Estas no entanto podem estar em mau estado ou haver maus contactos nos seus terminais, assim, opta-se por proteger o circuito contra sobretensões esporádicas. A situação de sobretensão considera-se, neste caso, quando a tensão limite máxima (V_{Sobret}) seja de 28V.

O circuito utilizado é similar ao de subtensão referido anteriormente mas com as entradas inversora e não inversora do AmpOp trocadas entre si. Neste caso as resistências do divisor de tensão serão denominadas de RP17 e RP18, conforme o representado na Figura 5-18.

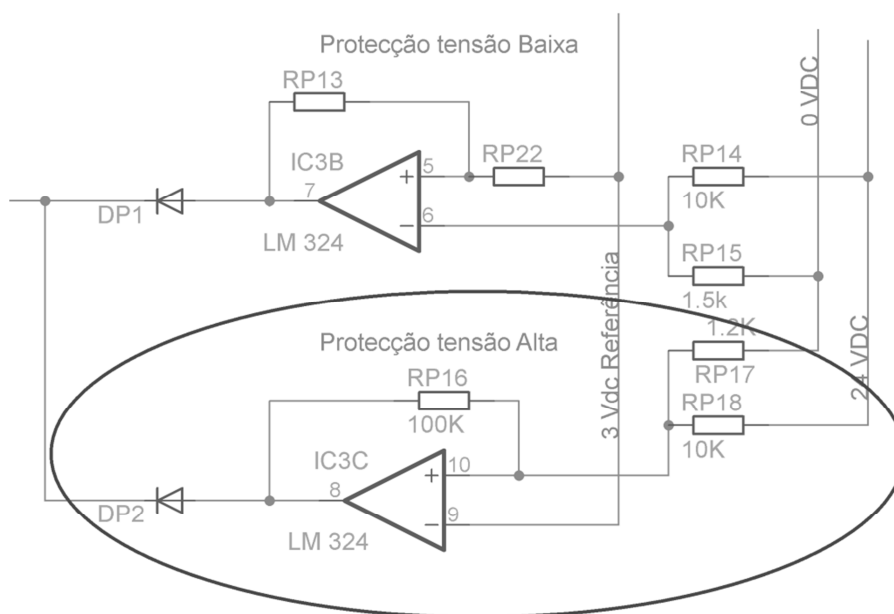


Figura 5-18: Divisor tensão para protecção sobretensão.

O valor de RP17 será:

$$RP17 = \frac{V_{ref} \times RP18}{V_{sobret} - V_{ref}} , \quad (5-32)$$

$$RP17 = \frac{30K}{27} \cong 1.2K . \quad (5-33)$$

5.5.4 Inibição por Excesso de Corrente

De modo a permitir futuras evoluções do sistema, equipou-se o circuito com uma proteção que inibe o funcionamento do circuito, caso o nível de corrente ou qualquer outra variável exceda um determinado valor. Este circuito encontra-se representado na Figura 5-19.

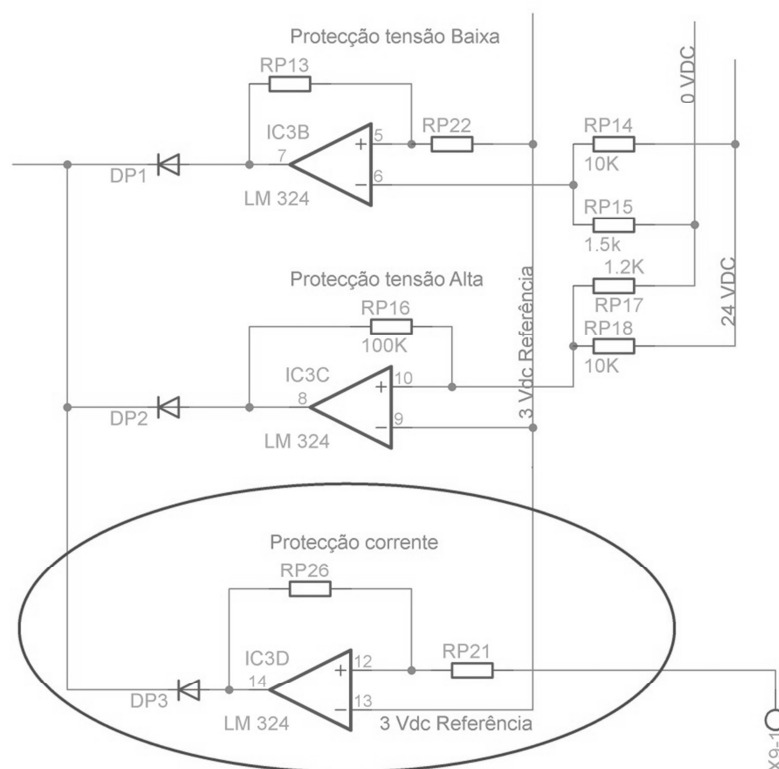


Figura 5-19: Inibição por excesso de corrente.

5.6 Placas Implementadas

Os circuitos anteriormente referidos e ainda outros que se revelaram necessários, foram primeiro testados com auxílio de uma *breadboard*. Após os necessários ajustes, foram construídas as placas de circuito impresso (*PCB*), que irão ser apresentadas de seguida.

Pretende-se assim que a evolução da eletrónica do veículo, demonstrada passo a passo, seja clara e explícita.

Inicia-se a descrição do trabalho realizado com as placas dos drivers dos motores, depois prossegue-se com o sistema de controlo dos drivers e com o módulo de alimentação para

alimentar a placa de controlo dos drivers e termina-se com o circuito de interface do *joystick*.

5.6.1 Modulador PWM

O modulador gera um sinal PWM em função de uma tensão de entrada. Tal como foi anteriormente referido, é necessária a geração de uma onda triangular de comparação.

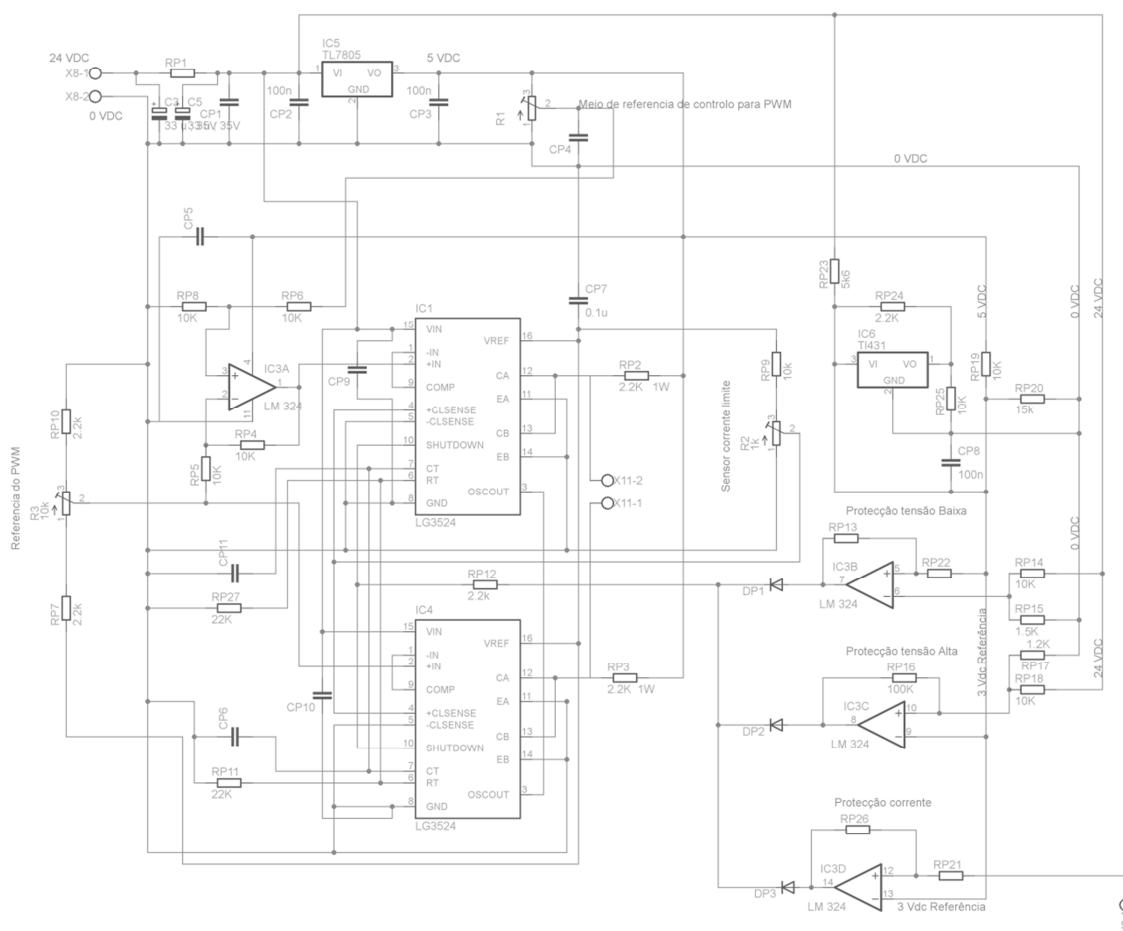


Figura 5-20: Esquemático de conversão de valor analógico para PWM.

Devido ao circuito real necessitar de dois circuitos de modulação (um para cada motor) este será apresentado para uma única ponte, sendo o segundo a duplicação do primeiro.

A alimentação do modulador é baseada numa fonte de 5V, tensão obtida à custa de um regulador de tensão TL7805. Esta tensão serve para circuitos de sinal.

A frequência de comutação é definida pela resistência RP27 e o condensador CP11, de acordo com a Figura 5-21.

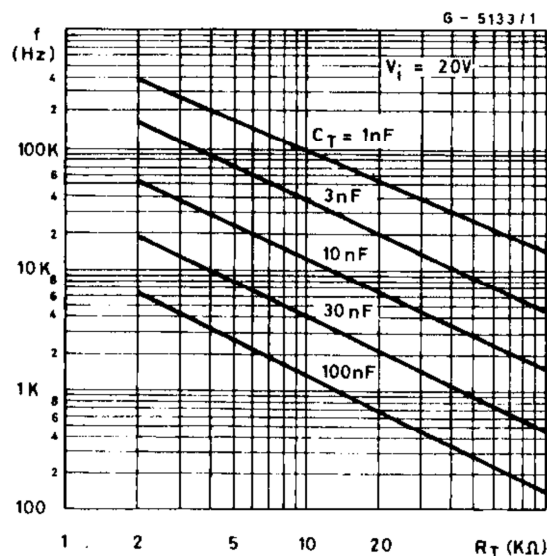


Figura 5-21: Curvas características de dimensionamento da frequência de oscilação.

Para obter uma frequência de 20 KHz, considerando um condensador de 3,3 nF, de acordo com o gráfico a resistência assume o valor de 22 KΩ.

As saídas do circuito integrado são em coletor aberto, deste modo é necessário a utilização de uma resistência de *pull-up* RP2 e RP3 de 2,2 KΩ com 1W de potência.

Os circuitos de proteção, tal como foi anteriormente referido, possuem três comparadores que inibem (*Shutdown*) o sistema quando ocorrem os eventos de: nível de tensão alta; nível de tensão baixa; níveis de corrente em excesso.

5.6.2 Circuito do Conversor

Tal como foi anteriormente referido, o conversor utiliza uma topologia em ponte. Devido à utilização de dois motores são necessários dois conversores, tal como o representado na Figura 5-22.

Página 79

Neste módulo agrupa-se toda a parte de potência do veículo, deixando de fora o controlo/comandos. A razão para esta metodologia prende-se com a separação de física dos circuitos que operam com sinais fracos em relação aos circuitos de eletrónica de potência.

Os problemas de compatibilidade eletromagnética são deste modo minimizados à partida.

As funções existentes nesta montagem contemplam vários pontos, como os dispositivos de comutação, o *driver* e a função *dead-time*. Nos dispositivos de comutação, com as características anteriormente referidas, faz-se uso do MOSFET IRFB3607. Estes dispositivos operam perante ordem do *driver*.

O *driver* usado foi o IR2103, que devido a sua topologia, tem características específicas tais como duas entradas: uma direta e outra negada e um *dead-time* pré-definido de 520 ns.

Apesar da placa ter sido desenhada para efetuar um *dead-time* (através dos díodos D1.1 e D2.1, das resistências R1.1 e R2.1 e dos condensadores C10.1 e C9.1 referente à meia ponte localizada na parte superior esquerda do esquemático), esta função não foi utilizada porque o *driver* já o inclui esta função.

Por esta mesma característica e por este *dead-time* ser suficiente, o circuito permanece com o lugar para um *dead-time* adicional que não foi utilizado.

Devido à parte superior do driver ser flutuante, utiliza-se um circuito denominado correntemente de *Bootstrap* formado pelo diodo D3.1 e pelo condensador C3.1.

5.6.2.1 Ensaio do Conversor

O conversor tem como entrada as tensões de alimentação e o sinal do modulador. Como o conversor não funciona sem o modulador, os ensaios demonstrados representam já a consequência de funcionamento destes dois. No intuito de se realizar testes parciais, concebeu-se na placa do modulador, um simulador de comando que irá estar inativo posteriormente.

Para os ensaios foi usado um osciloscópio Tektronix TDS 220.

Encontra-se representada na Figura 5-23 a tensão de saída diferencial a três níveis para um valor de tensão perto de zero. Na Figura 5-24 representa-se a saída para valores negativos da tensão de saída com dois valores de PWM distintos. Na Figura 5-25 efetua-se um teste

similar ao representado na figura anteriormente referida mas para valores de tensão de saída positivos.

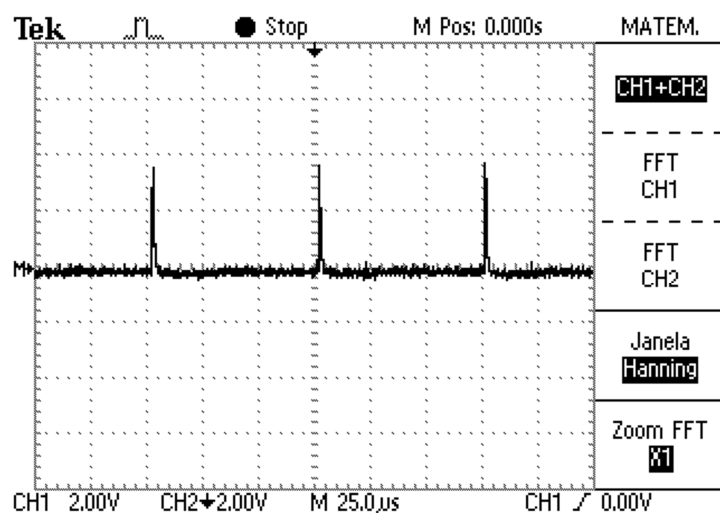
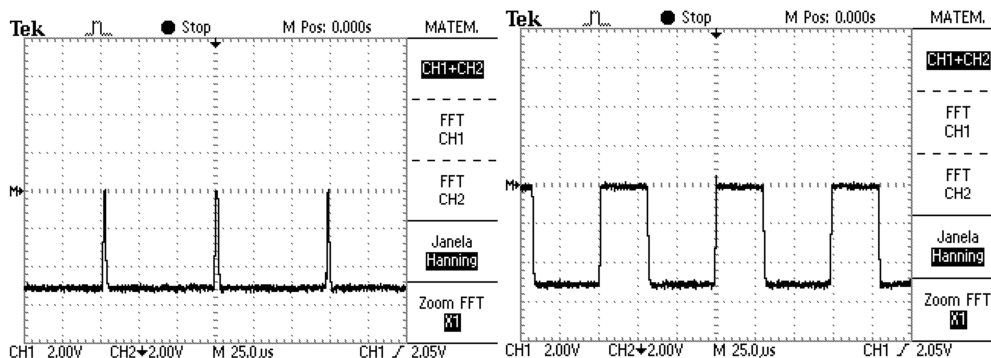


Figura 5-23: Saída diferencial para tensão de saída perto de zero.



a)

b)

Figura 5-24: Saída diferencial para tensão de saída inferior a zero: a) tensão de saída perto do limite máximo negativo; b) tensão de saída intermédia.

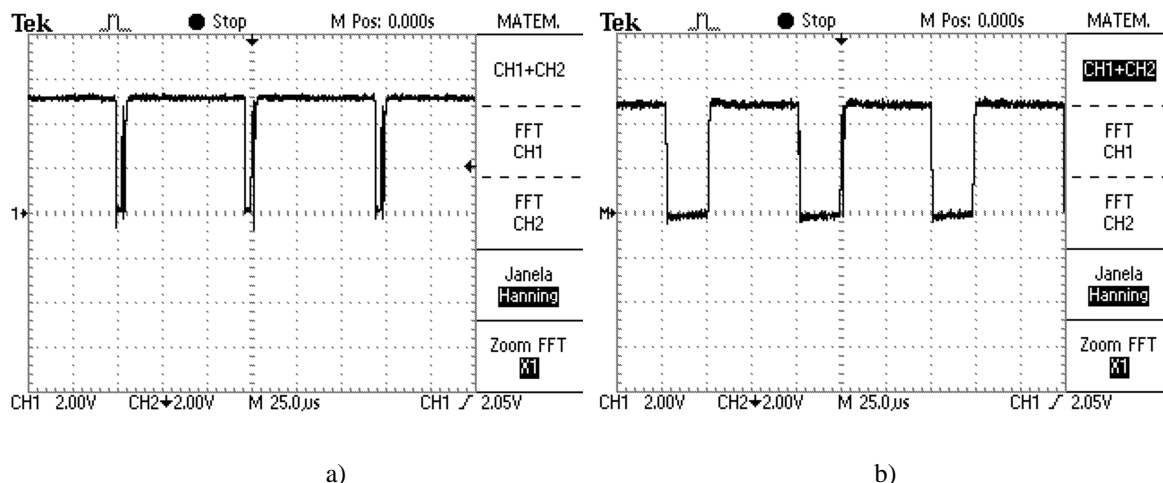


Figura 5-25: Saída diferencial para tensão de saída superior a zero: a) tensão de saída perto do limite máximo positivo; b) tensão de saída intermédia.

5.6.3 Placa de Interface Comando/Referência para PWM

Com o objetivo de adaptar as tensões geradas pelo *joystick* (que correspondem ao sistema de eixos XX e YY) com as tensões de entrada para o modulador, desenvolveu-se a placa de conversão de modo a implementar o modelo matemático desenvolvido.

Para além do modelo matemático desenvolvido chegou-se à conclusão que seriam necessárias ainda outras funcionalidades que serão explicadas de seguida.

Qualquer sistema de interface que recorra a recuperação por mola para o zero e que permita valores positivos e negativos terá dificuldade de apresentar valor nulo exato quando não existe atuação por parte do utilizador. Para evitar movimentos indesejados nesta situação utilizou-se a implementação de uma banda morta em torno do zero.

No sentido de permitir precisão de movimentos delicados e simultaneamente velocidades elevadas existe a possibilidade de seleção de duas escalas de velocidade, uma para movimentos de precisão (lento) e outra para velocidades elevadas (turbo).

De modo a evitar possíveis problemas devido a ruído, efetuou-se um filtro passa baixo por adição dos condensadores CP17 e CP 18 de 100nF.

Por último verifica-se que o circuito do modulador PWM permite à entrada unicamente tensões positivas, deste modo é necessário deslocar positivamente as saídas obtidas para um determinado valor correspondente ao valor médio da onda triangular gerada pelo SG3524.

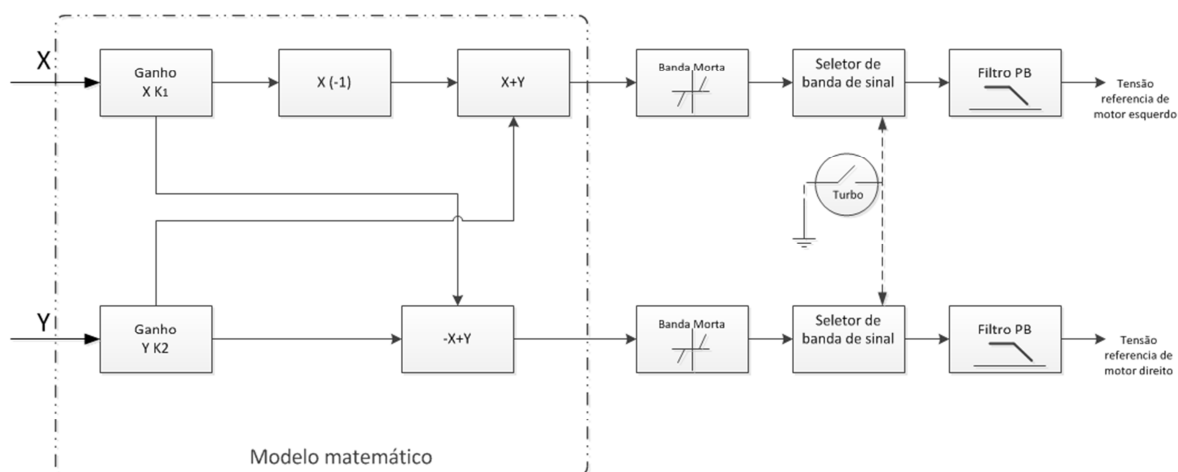


Figura 5-26: Diagrama de blocos do sistema de interface entre joystick e modulador.

A Figura 5-26, representa o diagrama de blocos da totalidade das funcionalidades apresentadas.

Em termos de organização, esta será dividida em vários pontos: andar inversor; montagem subtratora e amplificador.

O amplificador serve para proporcionar um ganho e também para que, independentemente das características das montagens, a corrente que seja pedida à saída do circuito não modifique a tensão de entrada (efeito de carga).

O andar inversor é composto por uma montagem inversora de sinal.

O esquema elétrico da placa de interface comando/referência para PWM encontra-se representado na Figura 5-27. A sua PCB encontra-se na Figura 5-28.

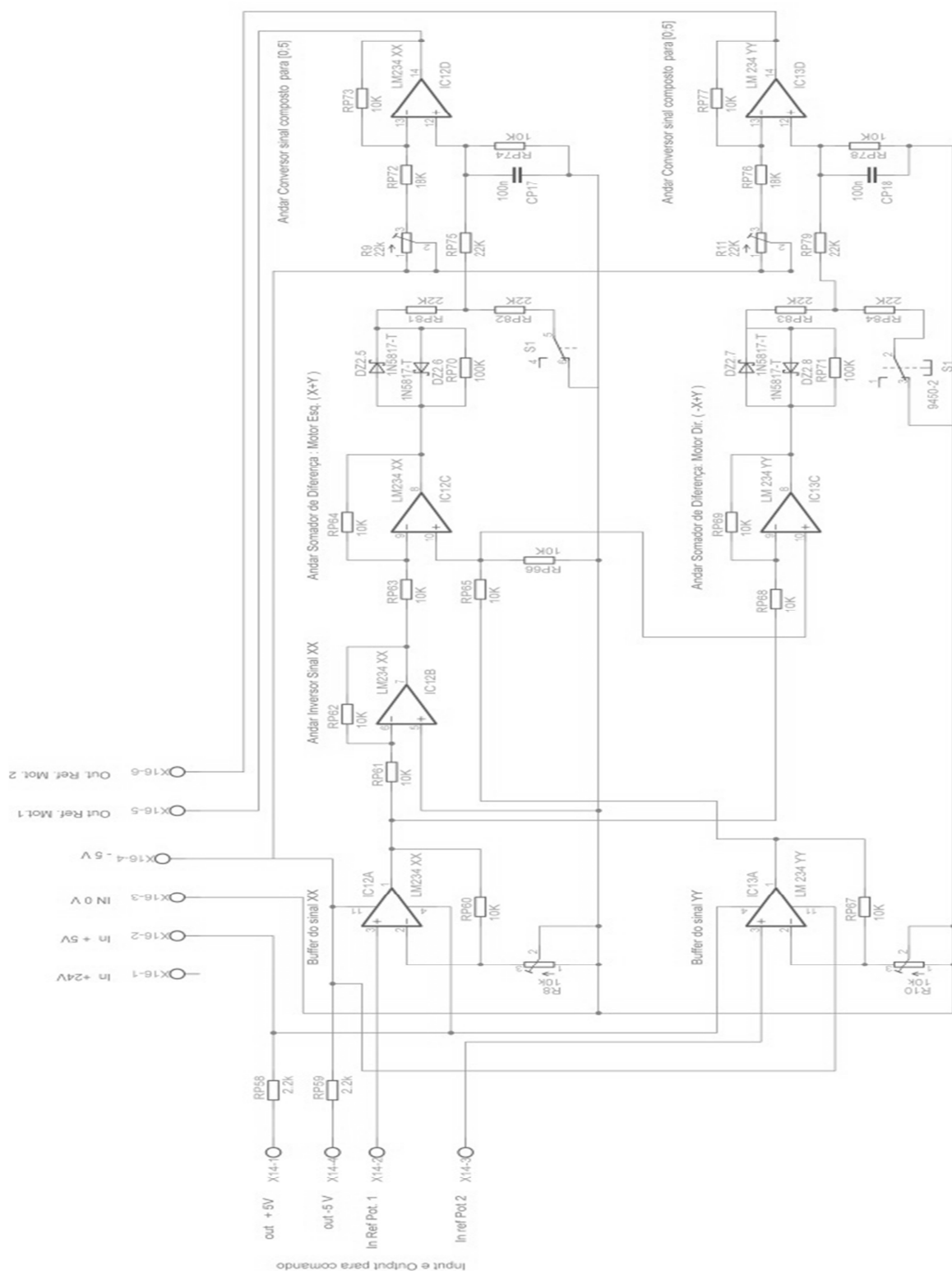


Figura 5-27: Esquema parcial de tratamento sinal do comando para placa PWM.

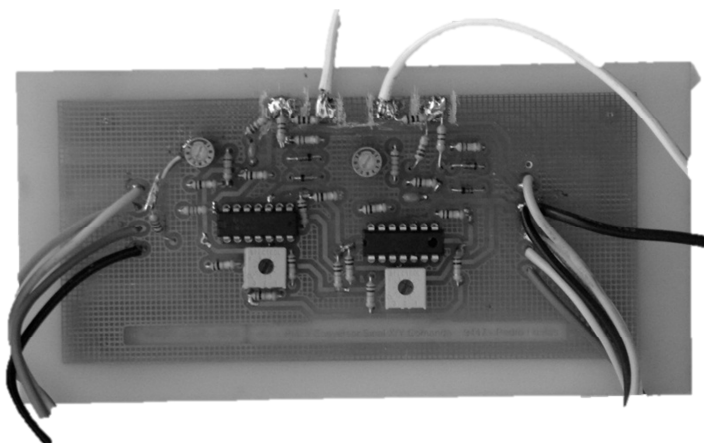


Figura 5-28: Placa do circuito de conversão do comando para placa PWM.

5.6.3.1 Modelo Matemático do Motor

O modelo matemático é implementado com o recurso a amplificador operacionais.

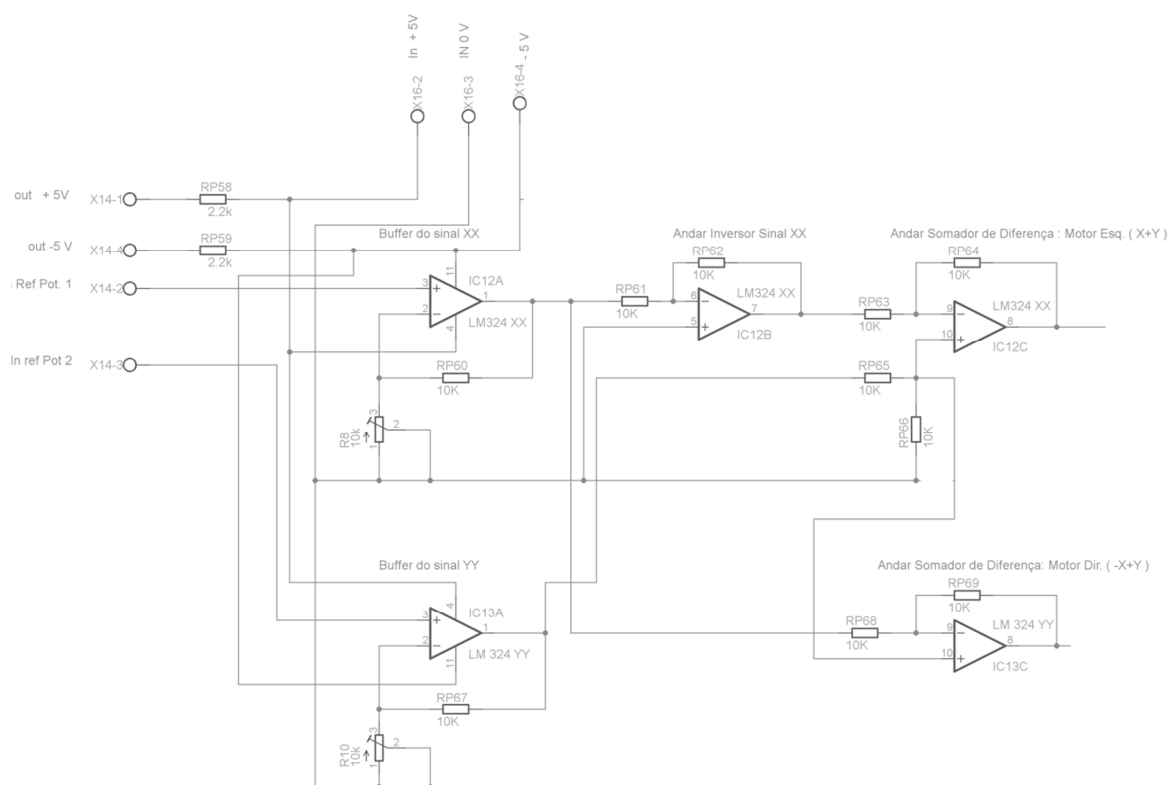


Figura 5-29: Esquema de implementação do modelo matemático do interface.

O esquema de implementação corresponde à execução das operações existentes no modelo matemático. Assim, os *AmpOp*'s definidos como IC12A e IC13A são montagens com um ganho definido pelo ajuste das resistências variáveis R8 e R10 respectivamente. Estes ganhos são referentes às tensões do comando.

O *AmpOp* mencionado como IC12B permite obter o simétrico do sinal de entrada, neste caso inverte a tensão obtida no canal XX. Por sua vez, os IC12C e IC13C são *AmpOp*'s que efetuam a expressão matemática para cada motor ($x+y$; $-x+y$).

5.6.3.2 Banda Morta

De modo a efetuar uma banda morta, utilizou-se um conjunto formado por dois díodos de Zener (DZ2.7 e DZ2.8) ligados em antiparalelo. Para evitar variações bruscas utilizou-se uma resistência de 100 K Ω em paralelo com estes.

A montagem em causa encontra-se representada na Figura 5-30.

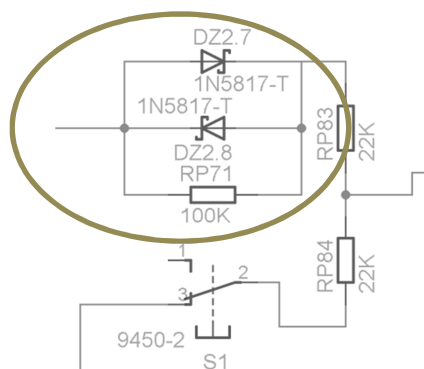


Figura 5-30: Esquema de implementação da banda morta.

5.6.3.3 Criação de Dois Níveis de Velocidade: Turbo/Lento.

De modo a obter dois níveis de velocidade, implementou-se um atenuador por divisor de tensão que é atuado pelo utilizador através de um interruptor duplo (uma parcela para cada motor).

O esquema encontra-se representado na Figura 5-31 .

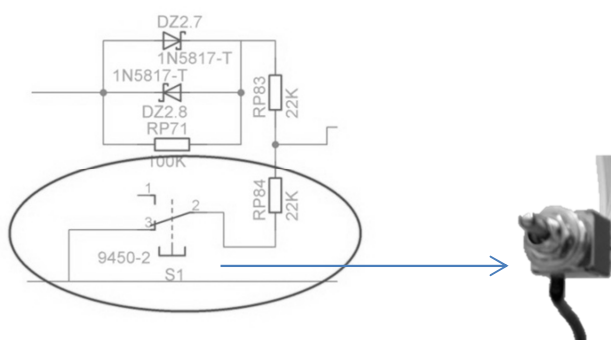


Figura 5-31: Esquema do seletor de velocidade.

5.6.4 Criação de Tensões Negativas

Devido à placa ter de funcionar com uma referência positiva ou negativa, existe a necessidade de que a alimentação dos *ampops* seja simétrica.

Ao pesquisar circuitos integrados que executem essa função, escolheu-se o MAX232N, o qual possui todas as características necessárias ao projeto.

A Figura 5-32 representa o circuito utilizado do integrado MAX232N, conforme o sugerido no seu *datasheet*.

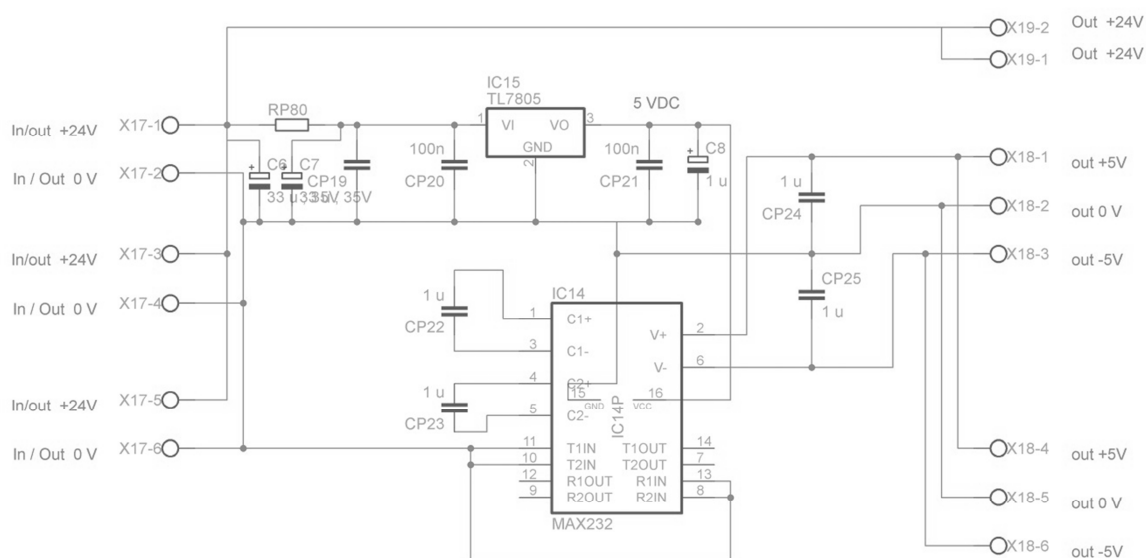


Figura 5-32: Esquema de placa para tensões simétricas.

Define-se que os condensadores CP22 e CP23 serão de $1\mu\text{F}$, e a sua tensão de alimentação, não será de 24Vdc mas sim de 5 Vdc. Esta tensão mais reduzida é produzida diretamente pelo TL7805.

A PCB realizada encontra-se representada na Figura 5-33.

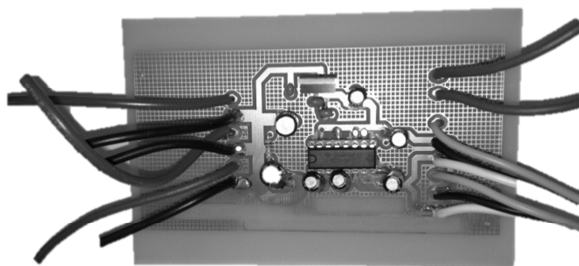


Figura 5-33: Imagem da placa tensões inversas.

Segundo o *datasheet* e também pelos resultados experimentais, a tensão de saída, não é efetivamente -5 a 5 Vdc podendo atingir em vazio -8 a 8 Vdc.

Os resultados experimentais obtidos encontram-se representados na Figura 5-34:

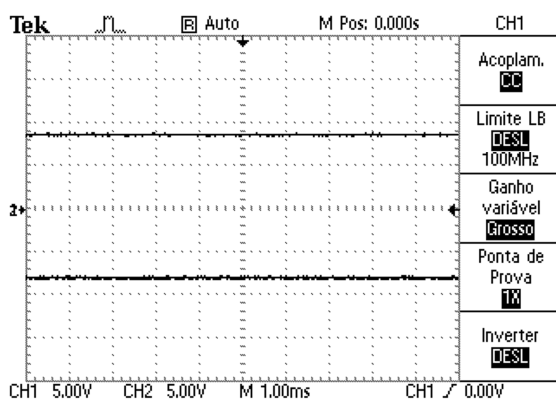


Figura 5-34: Tensões de saída +8 Vdc (canal 1), -8 Vdc (canal 2).

5.6.5 Placa de Ajuste dos Valores de Referência

O recurso a este modelo de comando tem como consequência que o retorno ao ponto zero de movimento seja feito com auxílio de molas, mas esta posição zero pode apresentar um desequilíbrio (valor diferente de zero).

Assim torna-se imperativo conseguir um ajuste na referência do comando, tal como o apresentado na Figura 5-35.

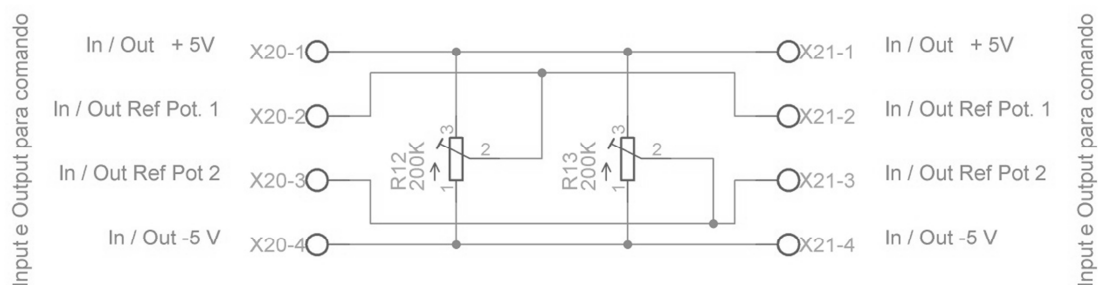


Figura 5-35: Esquema para ajuste set-point dos valores do comando.

O circuito apresentado será colocado na interligação do *joystick* com a placa de interface. Por ajuste dos potenciômetros, consegue-se obter um zero “físico” em concordância com o zero “eletrónico”.

Capítulo 6 Controle

O principal objetivo deste capítulo é identificar os parâmetros necessários à realização do controle dos motores. Inicialmente definem-se os tipos de controle que podem ser aplicados e o reflexo dos seus parâmetros no desempenho do controlador, seguidamente efetua-se o estudo do modelo do motor. Por último, desenvolve-se um sistema de estimação da velocidade do motor para possibilitar o fecho de malhas de controle.

6.1 Controle PID

Os controladores PID (Proporcional – Integral – Derivativo) são bastante utilizados para controlar o comportamento de vários tipos de sistemas. A sua popularidade advém do facto de, com o seu uso, se conseguirem na maior parte das vezes, bom desempenho do sistema em malha fechada.

Considere-se o sistema da Figura 6-1, no qual o objetivo é controlar a posição do eixo do motor DC [29] [30].

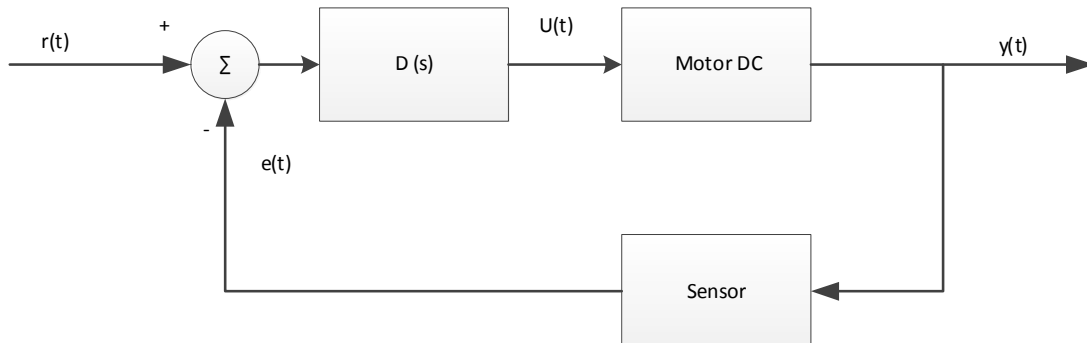


Figura 6-1: Representação do sistema de controle de um motor DC [31].

O sinal de posição (ou de velocidade) obtido pelo sensor de saída, $y(t)$, é subtraído ao sinal de referência, $r(t)$, para formar o sinal de erro, $e(t)$, que entra no controlador. Quando este sinal é diferente de zero, surge um sinal de entrada no controlador, consequentemente, a saída sofre alterações enquanto o erro não se anular.

6.1.1 Tipos de Controle

Os tipos de controladores possíveis de aplicar são: Controle Proporcional (P); Controle Integral (I); Controle Derivativo (D).

6.1.1.1 Controle Proporcional (P)

O nível de atuação, $u(t)$, é proporcional ao valor do erro $e(t)$ [31].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (6-1)$$

Este tipo de controle não consegue garantir um erro em regime final nulo.

6.1.1.2 Controle Integral (I)

Uma forma de anular o erro em regime final do controlador é fazer com que a variação no atuador (Δu) durante um intervalo de tempo (Δt) seja proporcional ao erro, de acordo com a equação (6-2).

$$\frac{d}{dt}u(t) = K_i \cdot e(t) \Rightarrow u(t) = K_i \cdot \int_0^T e(t) dt \quad (6-2)$$

6.1.1.3 Controle Derivativo (D)

A ideia por detrás da utilização da componente derivativa é reduzir o tempo até que o erro regime final atinja valores aceitáveis. Obtém-se assim uma componente “antecipativa” ao controle. Matematicamente, esta ideia pode expressar-se:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{d}{dt}e(t) . \quad (6-3)$$

6.1.2 Controle PID

Num controle PID utilizam-se as três componentes anteriormente referidas:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^T e(t) dt + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) . \quad (6-4)$$

A função de transferência $K(s)$ é obtida pela transformada de Laplace da equação de controle:

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) . \quad (6-5)$$

A equação (6-5) demonstra explicitamente os ganhos proporcional, integral e derivativo.

Definindo os ganhos com as seguintes características:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \text{ e } K_d = K_p T_d . \quad (6-6)$$

Surge assim a equação de transferência (6-7) [31].

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6-7)$$

O sinal de resposta a uma entrada em degrau pode ser aproximada pela resposta de um sistema de segunda ordem.

É de notar que é impossível obter uma resposta ideal havendo que jogar com compromissos entre o tempo de subida, o “overshoot”, o tempo de restabelecimento e o erro em regime permanente, tal como o representado na Figura 6-2.

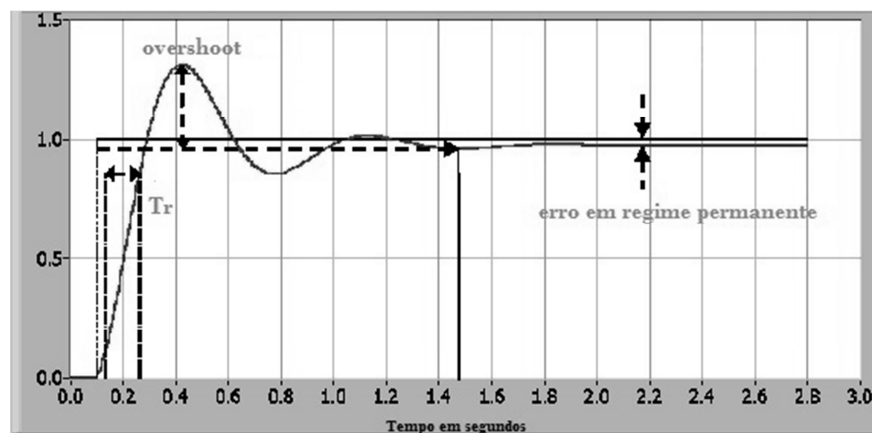


Figura 6-2: Exemplo de saída de um sistema com controlo PID [32].

6.1.3 Controle PI

Normalmente, em sistemas comutados, devido à existência de componentes de alta frequência nos sinais, evita-se a utilização da componente derivativa do contolo PID.

A equação (6-4) neste caso será:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^T e(t) dt \quad (6-8)$$

Ao fazer a transformada de Laplace desta equação, a função de transferência $K(s)$ será:

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (6-9)$$

Substituindo na equação (6-9) os dados da (6-6), determina-se a equação de transferência.

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (6-10)$$

Esta função pode ser descrita pelo diagrama de blocos representado na Figura 6-3.

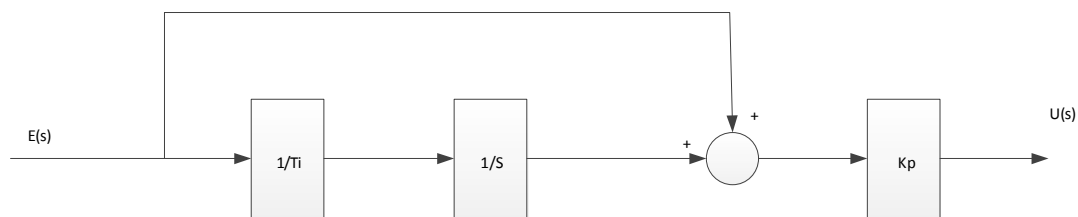


Figura 6-3: Diagrama de blocos de PI genérico.

6.2 Controle do Motor

O comando (malha aberta) é por definição, o colocar em funcionamento algo, e durante o seu funcionamento não corrigir a entrada em função do sinal de saída.

O controle (malha fechada) corresponde a uma ação corretiva permanente de adaptação no sentido da saída corresponder a uma réplica do sinal de entrada.

No caso concreto, pretende-se controlar a velocidade do motor. O erro pode-se definir como a diferença da rotação pretendida e a rotação real.

Para efetuar o controlo é necessário um sensor que meça a grandeza de saída. A maneira mais direta, mas por sua vez mais cara, é utilizar um *encoder* acoplado ao eixo do motor e assim determinar a sua velocidade. Por questões económicas optou-se por desenvolver um sistema de estimação da velocidade com base nas grandezas elétricas presentes no motor: corrente e tensão.

Com esse objetivo inicia-se esse trabalho pela identificação do modelo genérico do motor e respetivos parâmetros. Posteriormente desenvolve-se o estimador de velocidade.

6.2.1 Modelo Genérico do Motor

O Motor DC pode ser descrito através de um circuito equivalente, representado na Figura 6-4.

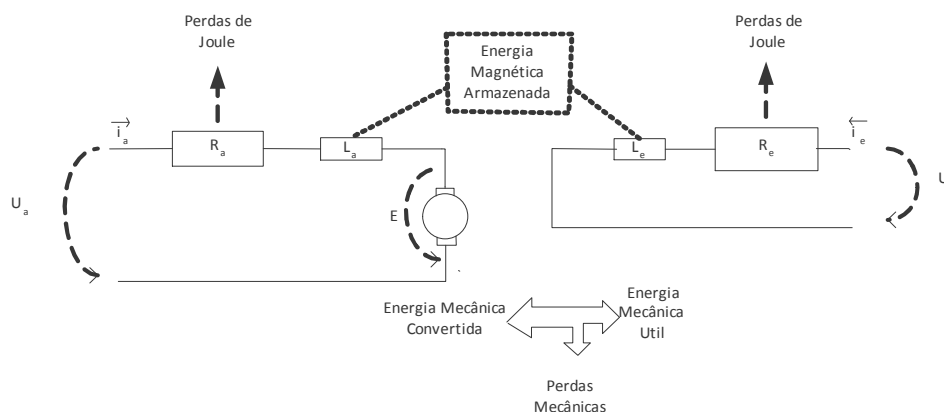


Figura 6-4: Circuito equivalente de motor DC.

Na figura:

- R_a representa a resistência da armadura;
- L_a representa a indutância do enrolamento do rotor;
- E representa a força eletromotriz gerada;
- i_a representa a corrente no rotor;
- U_a é a tensão de alimentação do rotor;
- L_e representa a indutância do enrolamento do estator;
- R_e representa a resistência do enrolamento do estator;
- i_e é a corrente no estator;
- U_e é a tensão no estator.

Para além das grandezas elétricas, existem ainda grandezas mecânicas, nomeadamente:

- K_a representa a uma constante construtiva;
- Φ representa o fluxo magnético no rotor;
- ω representa a velocidade angular do rotor;
- T representa o binário produzido pelo motor;
- K representa uma constante construtiva;
- J representa o momento de inercia do rotor;
- T_r representa o binário resistente;
- n representa a rotação em rpm;
- k_v representa uma constante adimensional.

Num motor elétrico existem características: elétricas; mecânicas e eletromecânicas as quais serão a seguir definidas.

Característica eletromecânica [33] [34]:

$$E = K_a \Phi \omega , \quad (6-11)$$

$$T = K_a \Phi i_a , \quad (6-12)$$

$$\Phi = K i_e . \quad (6-13)$$

Em que a constante de binário se define por:

$$\text{Constante binário} = K_a \Phi . \quad (6-14)$$

Característica Elétrica:

$$u_a = E + R_a i_a + L_a \frac{d i_a}{d t} , \quad (6-15)$$

$$u_e = R_e i_e + L_e \frac{d i_e}{d t} . \quad (6-16)$$

Característica Mecânica:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + T_r . \quad (6-17)$$

6.2.2 Desenvolvimento de um Estimador da Velocidade do Motor

Com base na equação (6-15) e como a dinâmica mecânica do sistema se sobrepõe à dinâmica do circuito elétrico pode desprezar-se o erro devido a L_a :

$$L_a \frac{d i_a}{d t} \cong 0 \quad (6-18)$$

Assim, a equação geral fica reduzida a:

$$u_a = E + R_a i_a \quad (6-19)$$

Por definição, a força eletromotriz representa-se por:

$$E = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (6-20)$$

$$k_v = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (6-21)$$

$$E = n k_v \quad (6-22)$$

Substituindo a equação (6-22) na (6-19) fica:

$$u_a = n k_v + R_a i_a \quad (6-23)$$

Explicitando a equação em ordem a n :

$$n = \frac{R_a i_a - u_a}{k_v} \quad (6-24)$$

Esta equação será a base de realização do estimador de velocidade.

De modo a realizar uma estimativa da velocidade de rotação é necessário conhecer as variáveis da equação. Numa perspetiva prática, optou-se por implementar o estimador com base no diagrama de blocos representado na Figura 6-5.

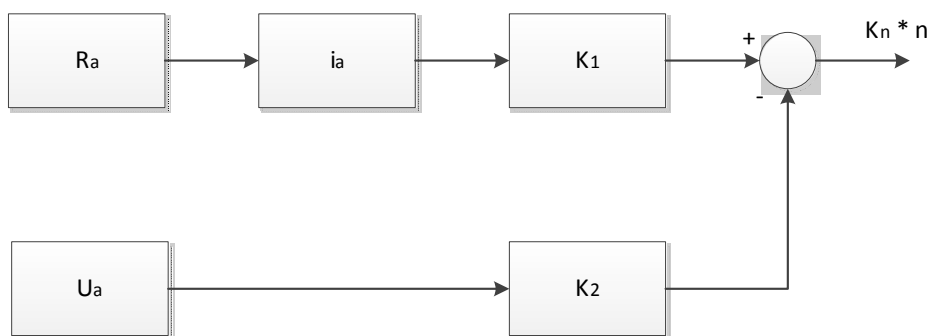


Figura 6-5: Diagrama de blocos da equação geral de estimativa da velocidade.

Resumindo, existem duas parcelas: a corrente i_a que será multiplicada pelo valor de R_a e a tensão U_a . Estas parcelas serão multiplicadas por fator de escala (K_1 e K_2) e posteriormente subtraídas.

De seguida ir-se-á descrever a realização de cada um dos blocos identificados assim como do circuito total do estimador.

Serão construídos circuitos para obtenção da tensão no motor (U_a) e da respetiva corrente (i_a) e será estimado o valor de R_a .

6.2.3 Cálculo da U_a

A tensão no motor é o diferencial de tensão entre as tensões de saída PWM de cada meia ponte. Note-se que a tensão de alimentação não está referenciada à massa, sendo diferencial.

Para uma real determinação da tensão de alimentação, os valores de cada meia ponte tem de ser subtraídos entre si. A tensão PWM presente no motor é composta por muitas componentes de frequência. A sua frequência fundamental será 40KHz, como se pretende o valor médio desta grandeza a baixa frequência é necessário filtrar as componentes de alta frequência.

Os níveis de tensão presentes às saídas de cada uma das meias pontes estará compreendida entre 0 e 24V. Estes valores são demasiados elevados para dar entrada nos circuitos com *AmpOp's*. A solução proposta passa por utilizar um divisor de tensão com um condensador acoplado que implementa simultaneamente a redução da tensão e a filtragem, conforme o representado na Figura 6-6.

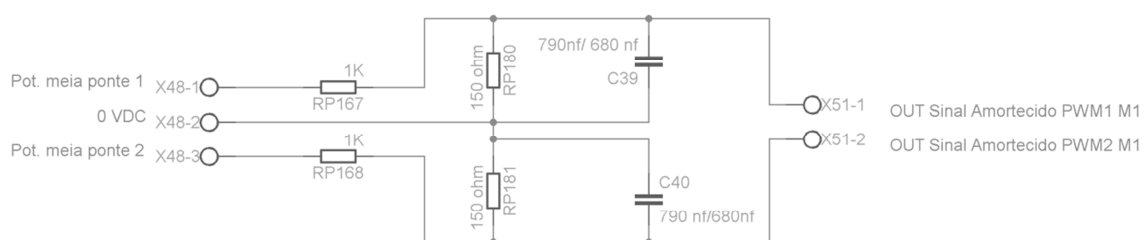


Figura 6-6: Montagem de redução de tensão e filtragem de U_a .

A Figura 6-7 e a Figura 6-8 representam a tensão à saída de uma das meias pontes e respectivo sinal depois de atenuado e filtrado (para duas velocidades do motor).

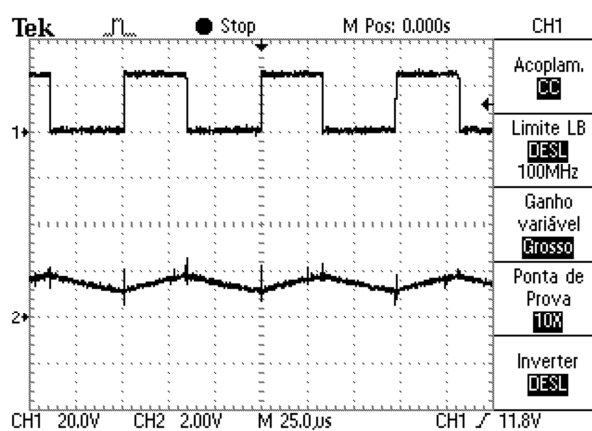


Figura 6-7: Tensão de saída da meia ponte (canal 1) e da saída filtrada (canal 2, em velocidade lenta).

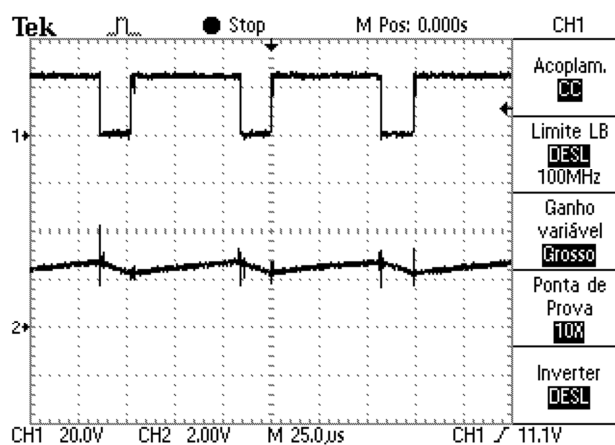


Figura 6-8: Tensão de saída da meia ponte (canal 1) e da saída filtrada (canal 2, em velocidade turbo).

Posteriormente a atenuar e a filtrar as tensões é necessário determinar a diferença de tensão entre as duas meias pontes. Este cálculo é efetuado através de um amplificador de diferença, tal como representado na Figura 6-9.

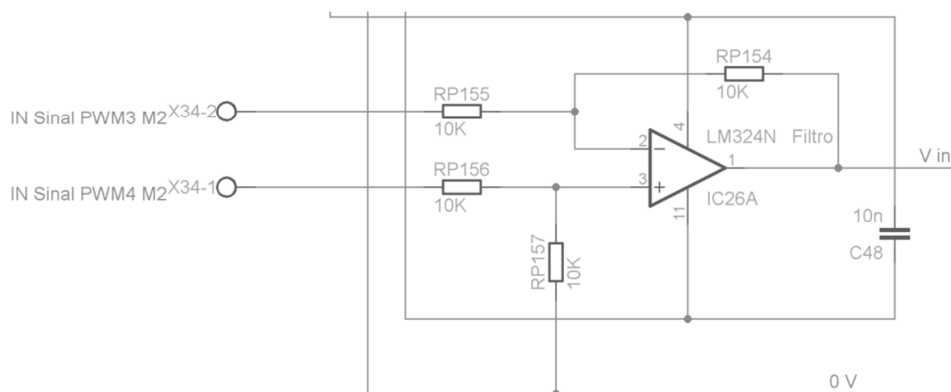


Figura 6-9: Montagem para determinar o diferencial da tensão do motor.

A filtragem efetuada serve unicamente para permitir a utilização de amplificadores operacionais com valores de tensão e *slew-rate* reduzidos. Para uma filtragem mais efetiva a saída do amplificador de diferença deve ainda ser filtrada. Com este propósito ir-se-á dimensionar um filtro do tipo *Butterworth*.

6.2.3.1 Cálculo filtro *Butterworth* 2º ordem

O circuito da Figura 6-10 representa o filtro *Butterworth* a dimensionar.

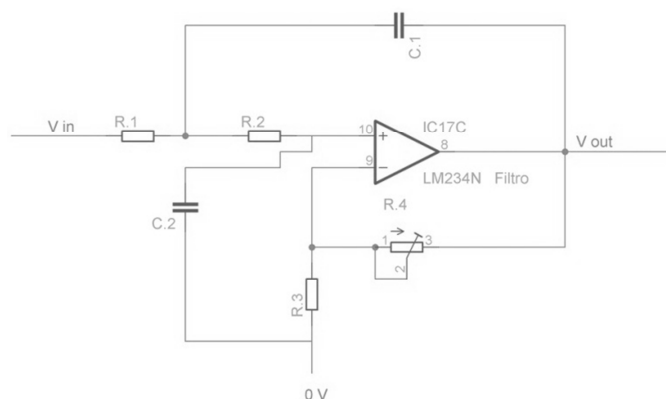


Figura 6-10: Tipologia de filtro *Butterworth* de 2º Ordem.

Com base nesta figura, pretende-se assim determinar o valor dos componentes. Arbitrou-se uma frequência de corte de 1 KHz .

Utilizando a referencia de projeto apresentada em [35] :

$$R = R_1 = R_2 , \quad (6-25)$$

$$C = C_1 = C_2 , \quad (6-26)$$

$$a_1 = 1,4142 , \quad (6-27)$$

$$b_1 = 1 , \quad (6-28)$$

$$Q = 0,71 , \quad (6-29)$$

$$\frac{R_4}{R_3} = 0,568 . \quad (6-30)$$

As equações de dimensionamento do filtro são:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + w_c R C (3 - A_0)s + (w_c R C)^2} , \quad (6-31)$$

$$A_0 = 1 + \frac{R_4}{R_3} , \quad (6-32)$$

$$a_1 = w_c R C (3 - A_0) , \quad (6-33)$$

$$b_1 = (w_c R C)^2 , \quad (6-34)$$

$$R_{1,2} = \frac{\sqrt{b_1}}{2 \pi f C} \text{ com } A_0 = 3 - \frac{a_1}{\sqrt{b_1}} = 3 - \frac{1}{Q} \text{ e } Q = \frac{1}{3 - A_0} . \quad (6-35)$$

Substituindo a (6-30) na (6-32), determina-se A_0 ;

$$A_0 = 1 + 0,568 = 1,568 . \quad (6-36)$$

Admitindo um valor de $10K\Omega$ para R_4 , pode calcular-se R_3 através do desenvolvimento da equação (6-30) :

$$\frac{10K}{R_3} = 0,568 , \quad (6-37)$$

$$R_3 = \frac{10 K}{0,568} = 17,60 K\Omega . \quad (6-38)$$

Determina-se o valor das resistências R e os condensadores C , com base nos valores assumidos anteriormente para a_1 e b_1 e utilizando as expressões (6-33) e (6-34), pode obter-se:

$$\begin{cases} a_1 = 1,4142 = w_c R C (3 - A_0) \\ b_1 = 1 = (w_c R C)^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1,4142 = (1K) R C (3 - 1,568) \\ 1 = ((1K) R C)^2 \end{cases}, \quad (6-39)$$

$$\begin{cases} R C = \frac{1}{1 * 10^3} \\ R C = \frac{1}{1 * 10^3} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R = 10K\Omega \\ C = 10 nF \end{cases}. \quad (6-40)$$

Os resultados experimentais obtidos com base no circuito dimensionado encontram-se representados na Figura 6-11.

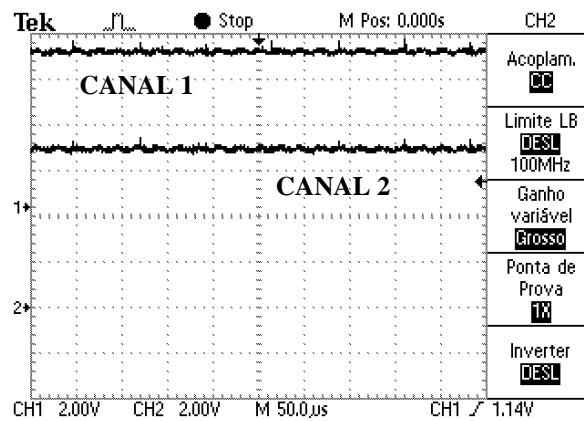


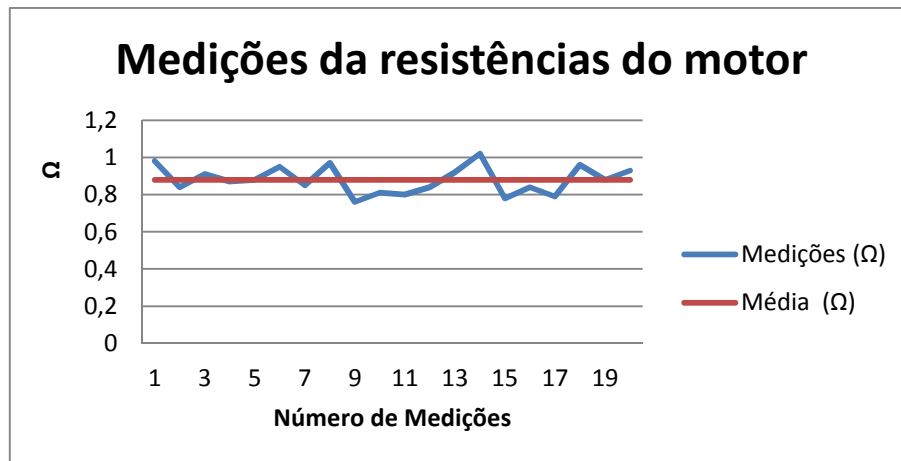
Figura 6-11: Respostas do filtro calculado (canal 2) com a referência (canal 1) com a máxima tensão positiva.

6.2.4 Valor da Resistência R_a

No sentido de obter o valor de R_a foram executadas 20 medições, com o motor em posições distintas para evitar a influência da posição das escovas. Posteriormente foi determinada a média destas medições:

$$\overline{R_a} = \frac{\sum_{i=1}^n R}{20}. \quad (6-41)$$

	Medições (Ω)		Medições (Ω)
1	0,98	11	0,8
2	0,84	12	0,84
3	0,91	13	0,92
4	0,87	14	1,02
5	0,88	15	0,78
6	0,95	16	0,84
7	0,85	17	0,79
8	0,97	18	0,96
9	0,76	19	0,88
10	0,81	20	0,93

 Tabela 6-1 – Tabela de registo dos valores de R_a .

 Figura 6-12: Dispersão de valores em relação à média de R_a .

Pelo cálculo da média, analisado na Tabela 6-1, determina-se a variável R_a :

$$\overline{R_a} = \frac{\sum_1^n R}{20} = \frac{17,58}{20} = 0,879\Omega \quad (6-42)$$

6.2.5 Corrente do Motor (i_a)

Para determinar a corrente com alguma precisão, faz-se uso de uma sonda de corrente.

A sonda de corrente usada é de referência HXS 50-Np, com capacidade de leitura de correntes até três patamares (12,5A; 25A; 50A).

Tendo em conta as características do motor, segundo a Tabela 4-2, a configuração assumida para a sonda é de calibre de 25A.

O método de ligação dos terminais da sonda no sentido de obter o calibre desejado encontra-se representado na Figura 6-13.

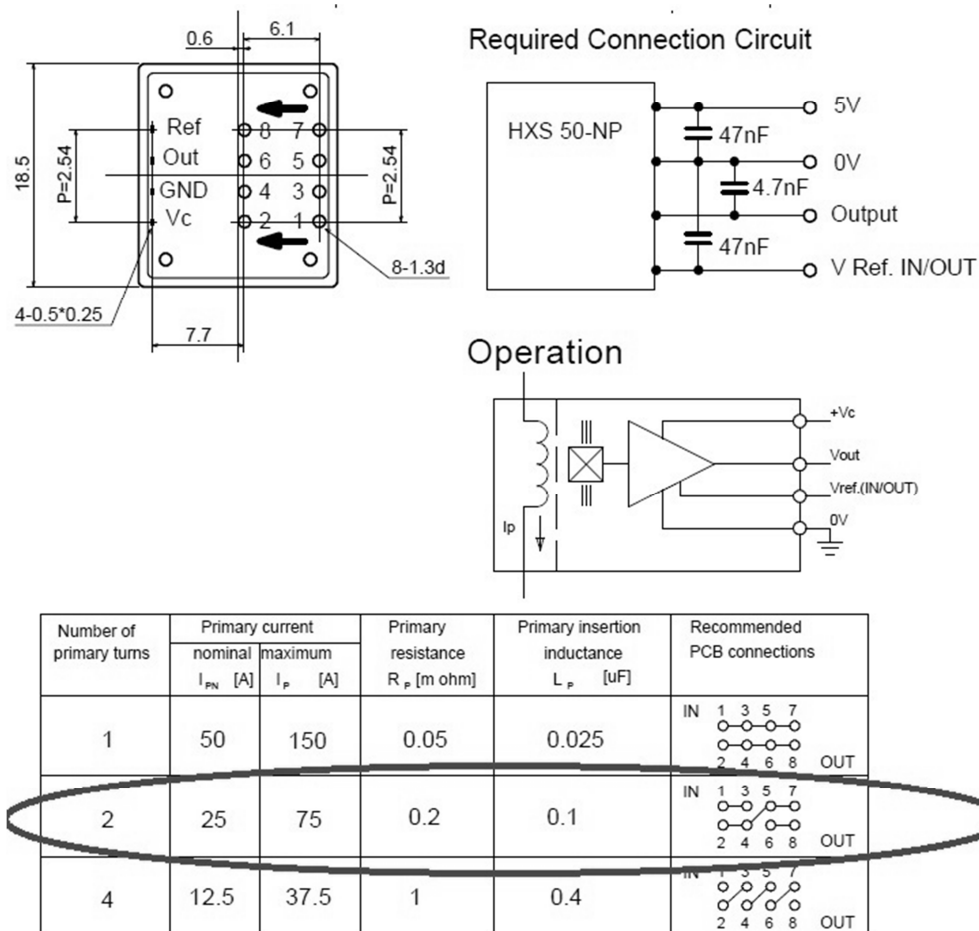


Figura 6-13: Excerto do Datasheet de sonda de corrente HXS 50-NP: esquema de ligação de sonda para 25A.

De acordo com as recomendações dadas pelo fabricante, realizou-se o esquema da Figura 6-14.

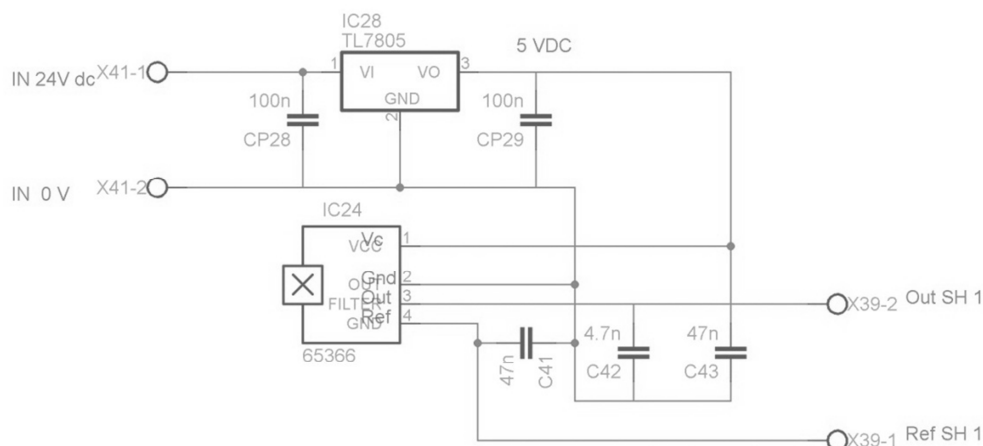


Figura 6-14: Esquema de ligação e calibração da sonda de corrente

A Figura 6-15 representa a PCB da sonda de corrente, esta será atravessada por intensidades de corrente na gama dos vários Ampère. Por se tratar de uma zona de correntes elevadas para a eletrónica, esta montagem foi executada em separado em relação à placa do estimador de velocidade. O objetivo desta separação é a redução das correntes induzidas e dos erros.

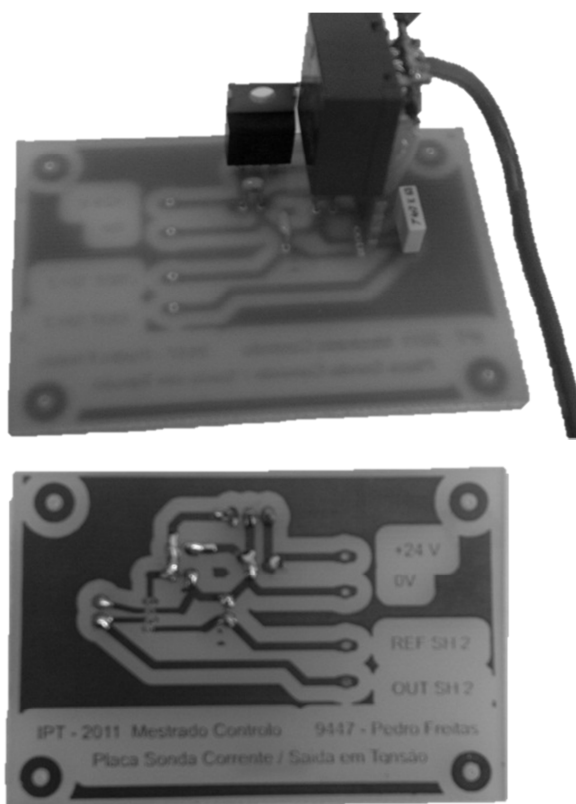


Figura 6-15: Imagem da aplicação da sonda de corrente com fios de potências separados.

A sonda é alimentada por uma tensão simples. Para permitir a leitura de correntes positivas e negativas o seu zero de saída é deslocado de um valor de referencia (acessível externamente no pino *Ref Sh*). Deste modo, uma saída de 0 V (pino *Out Sh*) representa - 25A. Para uma tensão de saída de 5V (pino *Out Sh*) a corrente que a percorre será de 25 A.

Para obter um valor referenciado aos 0V será necessário a utilização de um circuito que execute a diferença entre a tensão de saída da sonda e a tensão de referencia, tal como representado na Figura 6-16. A resistência variável tem a finalidade de permitir o ajuste do ganho.

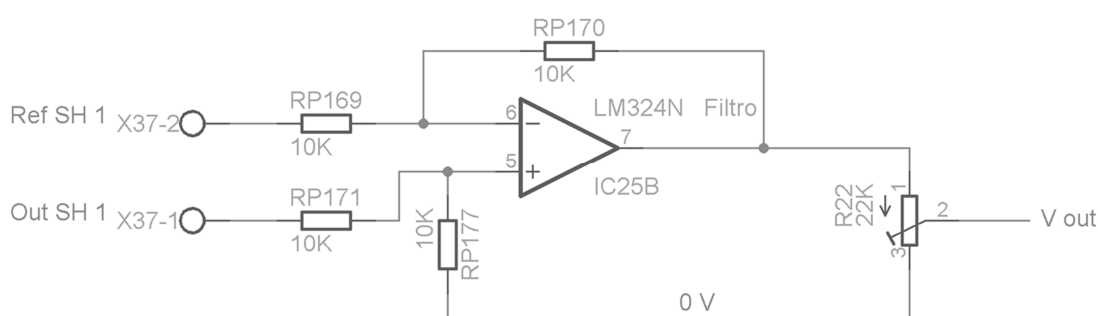


Figura 6-16: Montagem do andar de diferença entre a referência e a tensão referencial da sonda.

O circuito completo da realização do estimador encontra-se representado na Figura 6-17.

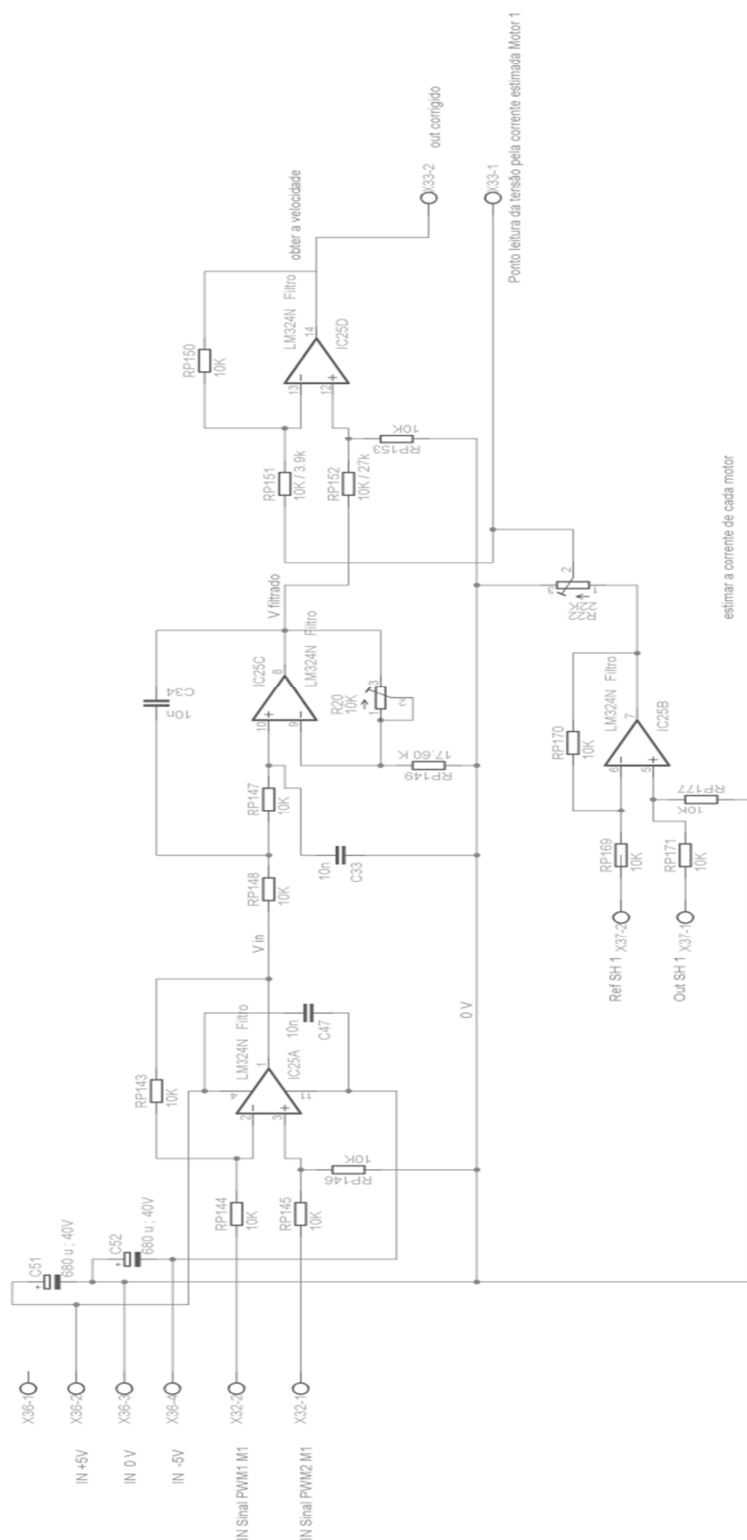


Figura 6-17: Montagem do andar estimador da velocidade de rotação do motor.

Efetuarão-se ensaios no sentido de verificar o funcionamento do circuito. A Figura 6-18 representa a estimativa da velocidade quando o motor está trancado mecanicamente. Na Figura 6-19 representa-se a estimativa da velocidade máxima em ambos os sentidos possíveis do motor.

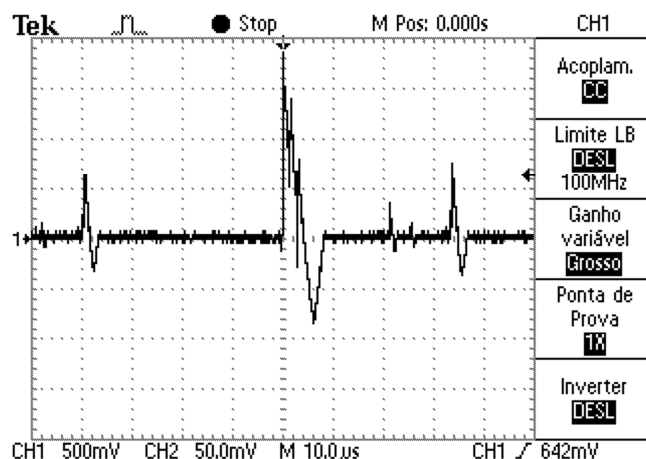


Figura 6-18: Sinal da rotação estimada com o rotor trancado mecanicamente.

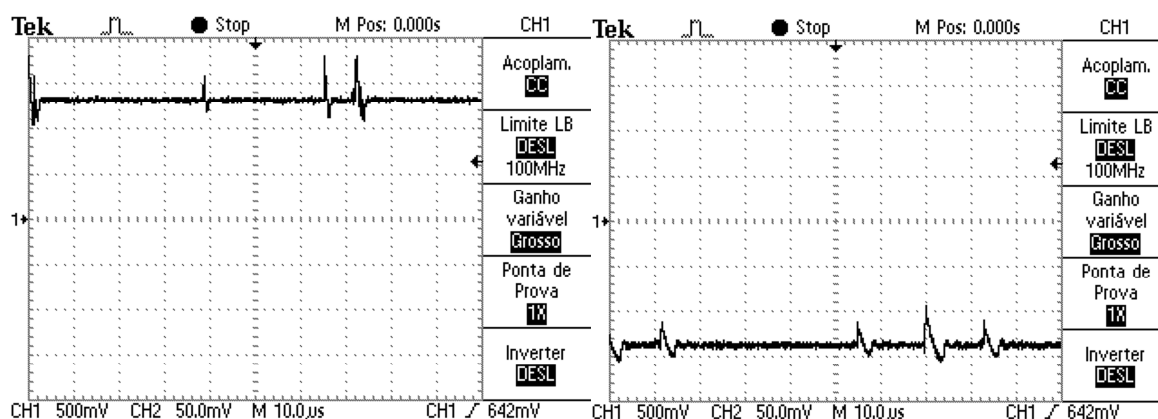


Figura 6-19: Sinal da rotação estimada com o rotor em movimento máximo positivo (figura da esquerda) e negativo (figura da direita).

6.2.6 Testes ao Sistema

Para os testes de todo o circuito, incluindo placa de interface, conversor e estimador, mediu-se a tensão à entrada do modulador e à saída do estimador para três situações distintas. Na Figura 6-20, Figura 6-21 e Figura 6-22, representam-se as situações de velocidade máxima negativa, positiva e nula, respetivamente.

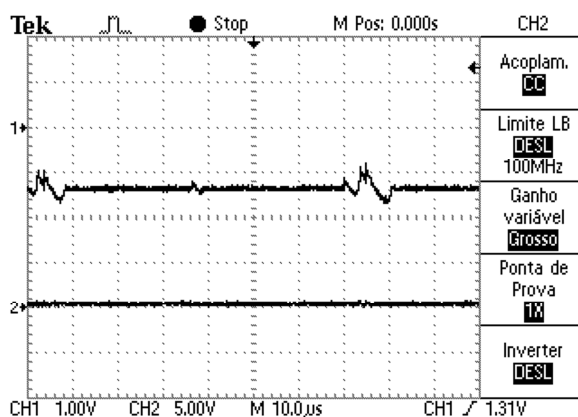


Figura 6-20: Sinal da velocidade estimada (canal 1) com a referência do comando (canal 2) para o mesmo motor, motor em movimento máximo negativo.

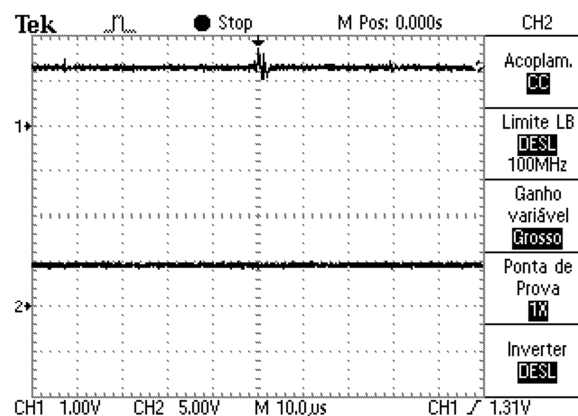


Figura 6-21: Sinal da velocidade estimada (canal 1) com a referência do comando (canal 2) para o mesmo motor, motor em movimento máximo positivo.

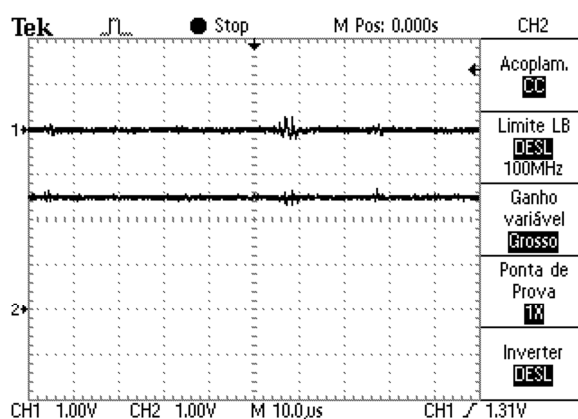


Figura 6-22: Sinal da velocidade estimada (canal 1) com a referência do comando (canal 2) para o mesmo motor, motor em estado imóvel.

É importante lembrar que o sinal de entrada no modulador deverá variar entre 0 e 5V, o que corresponde à velocidade máxima negativa e positiva, respetivamente, sendo a saída nula para um valor intermédio, o que está de acordo com os resultados experimentais.

Capítulo 7 Conclusões

Nesta secção pretende-se identificar o trabalho realizado e as conclusões obtidas ao longo desta dissertação. Focam-se ainda as perspetivas de evolução futura.

7.1 Conclusão

O presente trabalho incidiu sobre a construção, a melhoria do desempenho, o reforço da segurança e a adaptabilidade de um protótipo de veículo de configuração “*Duo Wheel*”.

No primeiro capítulo: *Introdução*, todo o projeto é concebido no sentido de permitir vários tipos de utilização sem descurar a utilização por parte de pessoas com limitações de mobilidade. Nesse sentido o desenvolvimento teve em conta a segurança, a adaptabilidade e ergonomia do veículo. Pretende-se que este possa ser utilizado em ambientes com restrições de espaço (habitações, espaços comerciais, escolas, etc.). Deste modo o interface permite movimentos como girar sobre si próprio, o que facilita a mobilidade.

No segundo capítulo: *Estado da Arte*, foi realizada uma pesquisa no sentido de analisar sistemas que tenham sido um marco na evolução deste tipo de veículos. Alguns destes tiveram utilização, quer a nível militar, quer a nível industrial, como trator ou mesmo um como veículo de deslocação ou de diversão (mota e veículo “*EDWARD Project*”). Este tipo de veículos apresenta uma dinâmica complexa, podendo mesmo tornar-se instável, o que limita o seu leque de aplicações.

No terceiro capítulo focaram-se os *Conceitos Físicos*. São apresentadas os métodos de cálculo das várias forças aplicadas no veículo.

No quarto capítulo foca-se a implementação da *Estrutura Mecânica*, explica-se o método de deslocamento do veículo, desenvolve-se o sistema de acoplamento motor/roda e a própria estrutura do habitáculo. Aborda-se a aplicação do motor e das baterias no protótipo e ensaia-se a resposta a vários ângulos de sópé.

No quinto capítulo foca-se o *Comando*. Explica-se e dimensiona-se o conversor, o *driver* a ser aplicado, o comando de interface e a adaptação do comando. Apesar destes circuitos terem sido desenvolvidos no protótipo de veículo, as mesmas estão dimensionadas para um veículo de escala superior.

O sexto capítulo debruça-se sobre o *Controlo*. Neste capítulo explica-se a base do sistema do controlo linear. Recorrendo ao modelo do motor, desenvolveu-se um método de estimar a velocidade do motor com base na corrente e na tensão aos seus terminais. Para a conclusão da malha de controlo será somente necessário implementação do controlador.

De acordo com os objetivos identificados no capítulo introdutório da presente dissertação, podem identificar-se as principais contribuições originais:

- Desenvolvimento de um acoplamento motor/roda, estável, robusto e funcional.
- Desenvolvimento de um interface Homem/máquina original, ergonómico e intuitivo para o utilizador. Este permite raios de viragem reduzidos, (devido à sua configuração e interface do comando).
- Desenvolvimento de um estimador de velocidade com base nas grandezas elétricas presentes no motor.

Para além das contribuições originais, o trabalho desenvolvido permitiu:

- Desenvolvimento de uma estrutura mecânica para o protótipo, com uma estética apelativa.
- Desenvolvimento de conversores a operar com um PWM a três níveis.
- Possibilidade de adaptabilidade a pessoas com redução motora, pela simplicidade de comando do veículo.

7.2 Perspetivas de Desenvolvimento Futuro

Esta dissertação e a própria implementação não conclui o muito do que há para desenvolver. Nesta secção pretende-se, pois, apresentar várias direções, em vários campos (controlo, comando e estrutura física), nos quais se julga possível efetuar uma evolução.

7.2.1 Controlo

No âmbito do controlo, o projeto pode evoluir nos seguintes pontos:

- Términus do fecho da malha de controlo do motor.
- Modelização do comportamento do veículo em termos de travagem e aceleração.

- Inserção de estimadores de inclinação, necessários para efetuar o controlo do protótipo em escala real, em termos de estabilidade na travagem e na aceleração.
- Realização do controlador de estabilidade em termos de travagem e aceleração.
- Realização de comando através de uma *Dockstation* de carregamento e comando assim como possível funcionamento por via *wireless* (importante para pessoas desabilitadas).

Ao fechar a malha de controlo no motor permite-se que a velocidade e a direção sejam relativamente independentes do tipo de piso em cada roda.

A inserção de estimadores de inclinação do habitáculo e respetivo controlo permite suavizar as perturbações no ocupante, salvaguardando a inversão do habitáculo.

7.2.2 Comando

A comunicação do *joystick* por via remota permite que o veículo possa libertar espaço no caso de uma pessoa desabilitada não necessitar temporariamente do veículo.

Ao nível de segurança, quando o comando comunicar em via remoto (fora da *Dockstation*) o sistema só deverá poder funcionar com a velocidade lenta. Com o comando dentro do veículo (em base e fixação própria), este poder-se-á deslocar em velocidade lenta ou mais rápida.

7.2.3 Estrutura Física

Com a estrutura em escala real, esta poderá pensar em se desenvolver um sistema de cadeira que permita uma fácil inserção no veículo.

Capítulo 8 Bibliografia

- [1] “EDWARD,” Engenharia Mecânica da Universidade de Adelaide, [Online]. Available:
http://sites.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/robotics_projects.php?wpage_id=44&title=60&browsebyauthor=115. [Acedido em 20 08 2011].

- [2] “The Kerry Mclean Monowheels,” [Online]. Available:
<http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/TRANSPORT/motorwhl/motorwhl4.htm>. [Acedido em 22 Dezembro 2011].

- [3] "Coker, bike one wheel," [Online]. Available: <http://blog.cokertire.com/general-post/to-coker-is-a-verb-with-one-wheel-and-tire-on-it/>. [Accessed 20 Março 2011].

- [4] J. Chabanaïs, "Tractor one wheel," [Online]. Available:
http://www.jackiechabanaïs.com/the_tractowheel.htm. [Accessed 20 Março 2011].

- [5] Davecat, "Bike One Wheel 3," 16 Novembro 2007. [Online]. Available:
<http://www.kuroneko-chan.com/echoes/?p=549>. [Accessed 20 Março 2011].

- [6] “aqpl43.dsl.pipex,” [Online]. Available:
<http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/TRANSPORT/motorwhl/motorwhl.htm#rous>. [Acedido em 20 Dezembro 2011].

- [7] “vinicblog.blogspot.pt,” [Online]. Available:
<http://vinicblog.blogspot.pt/2011/01/invencoes-do-seculo-passado-que-nao.html>. [Acedido em 6 Dezembro 2011].

- [8] “Dark Roasted Blend,” [Online]. Available:
<http://www.darkroastedblend.com/2007/11/strange-tanks-part-2.html>. [Acedido em 6 Dezembro 2011].

- [9] “Modern Mechanics,” [Online]. Available: <http://blog.modernmechanix.com/homemade-tractor-has-one-wheel/#more-2113>. [Acedido em 20 Dezembro 2011].
- [10] “Hemmings Daily,” [Online]. Available: <http://blog.hemmings.com/index.php/2008/06/05/tractor-tires-and-gyroscopes-charles-taylors-one-wheel-experiments/>. [Acedido em 22 Dezembro 2011].
- [11] “WebLuxo,” [Online]. Available: http://www.webluxo.com.br/menu/motos/monowhell_moto_1_roda.htm. [Acedido em 20 Dezembro 2011].
- [12] M. M. R. R. Costa e M. J. B. M. d. Almeida, Fundamentos de Física, 2º ed., Coimbra: Livraria Almedina, 2004, pp. 11-48.
- [13] “Só Física,” [Online]. Available: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Mecanica/Cinematica/mc.php>. [Acedido em 04 10 2011].
- [14] T. D. Gillespie, Fundamentals of vehicles dynamics, Society of Automotive Engineers, ISBN 1-56091-199-9, 1992.
- [15] “Peso / Força Gravitica,” [Online]. Available: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Peso>. [Acedido em 19 09 2011].
- [16] Granchinho de Matos, Pedro Manuel;, “Modelos e optimização energética de veículos eléctricos,” 2005.
- [17] T. d. Freita, “Força Peso,” [Online]. Available: <http://www.infoescola.com/fisica/forca-peso/>. [Acedido em 19 09 2011].
- [18] M. T. M. d. Sá, “Força e Movimento,” em *Física 12º ano*, 1º ed., Lisboa, Texto Editora, 2001, pp. 48-53.

- [19] J. Wong, Theory of ground vehicles, Ottawa: John Wiley and Sons, Inc, ISBN 0-471-52496-4, 1993.
- [20] G. Genta, Motor Vehicle Dynamics - Modelling and Simulation, World Scientifics, 1997.
- [21] “<http://bateriastotal.com>,” [Online]. Available: <http://bateriastotal.com/bat/es/baterias-yuasa/1191-bateria-ciclica-yuasa-agm-npc2412-12v-24ah.html>. [Acedido em 22 Março 2011].
- [22] “Bateria,” [Online]. Available: <http://filestore.vianett.no/download/31ca80c5ade0182abad3f1fb8cf808e8/NPC24-12IDataSheet.pdf>. [Acedido em 26 Abril 2011].
- [23] Mat-Con, “Motor 400W,” [Online]. Available: http://shop.mat-con.net/epages/62158737.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/62158737/Products/my1018_24V. [Acedido em 30 Abril 2011].
- [24] WIKIPÉDIA, “Cambagem, imagem,” [Online]. Available: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cambagem>. [Acedido em 28 Setembro 2011].
- [25] R. A., Contributos para um Controlo de Tracção de um Veículo Elétrico Bimotor, Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2001.
- [26] M. N., U. T.M. e R. W. P., Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- [27] *Datasheet IRFB/S/SL3607PbF*, International rectifier.
- [28] R. Monteiro, *Sebenta de Electronica de Potência 2008/09*, 2008.
- [29] A. V. Oppenheim, Signal And Systems, U.S.A: Pretice/Hall international, Inc, 1983.
- [30] K. Ogata, Modern Control Engineering, 2º ed., Prentice Hall International Editions,

1990.

- [31] G. F. Franklin, J. D. Powell e A. Emani-Naeimi, *Feedback Control Of Dynamics Systems*, 3º ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [32] “Explicando a Teoria PID,” National Instruments, [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt>. [Acedido em 02 06 2012].
- [33] B. C. kuo, *Automatic Control Systems*, 7º ed., John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [34] M. I. Ribeiro, *Análise de Sistemas Lineares*, vol. 2, Lisboa: IST Press, 2002.
- [35] Ronmanssini, *Op Amps for every one*, Texas instruments, 2002.
- [36] “Rolling Resistance,” [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html. [Acedido em 12 01 2012].
- [37] “Coeficiente de resitencia aerodinâmica,” [Online]. Available: http://pt.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_resist%C3%A2ncia_aerodin%C3%A2mica. [Acedido em 04 10 2011].
- [38] J. D. d. Deus, M. Pimenta, A. Noronha, T. Peña e P. Brogueira, “Estabilidade de sistemas. Movimentos oscilatórios,” em *Introdução à física*, 2ª ed., Lisboa, McGraw Hill, 2000, pp. 165-175.